

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**Estudio de los efectos de las propiedades físicas de
las mezclas binarias diésel-biodiesel sobre las
características del chorro de combustible líquido**

POR

ING. FERNANDO GUEVARA ROMERO

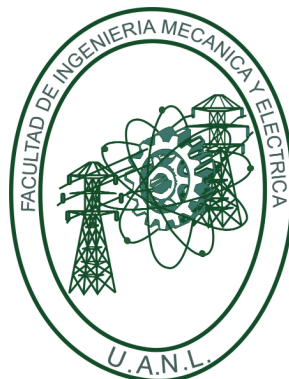
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

AGOSTO 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**Estudio de los efectos de las propiedades físicas de
las mezclas binarias diésel-biodiesel sobre las
características del chorro de combustible líquido**

POR

ING. FERNANDO GUEVARA ROMERO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

AGOSTO 2019

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis *«Estudio de los efectos de las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiésel sobre las características del chorro de combustible líquido»*, realizada por el alumno Fernando Guevara Romero, con número de matrícula 1223147, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

El Comité de Tesis



Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León
Director



Dr. Simón Martínez Martínez
Co-Director

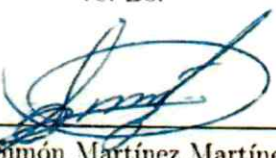


Dra. Violeta Yasmín Mena Cervantes
Revisor



Dr. Daniel de la Rosa Urbalejo
Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirección de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, agosto 2019

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer infinitamente a Dios por sobre todas las cosas, ya que él fue el que me permitió llegar hasta este punto de mi vida, él me hizo Ingeniero y ahora me esta haciendo un Máster. Todo lo que tengo es por su gracia. Así que en este punto de mi vida puedo decir “*Ebenezer*”, hasta aquí Dios me ha ayudado.

Agradezco a mi papá Candelario Guevara Arriaga por ser un gran ejemplo para mí, por ayudarme en todo y nunca dejarme sólo, y aunque nunca se lo digo en persona (por que soy muy frío en ese aspecto) lo amo mucho, lo admiro mucho, y él ha sido parte fundamental en mi formación desde niño hasta esta etapa de mi vida, él es mi ídolo.

Agradezco a mi mamy Alicia Romero Hernández por ser la mejor madre que Dios me pudo haber dado, gracias por sus consejos y enseñanzas a lo largo de mi vida, por sus cuidados y atenciones hacia mí, por amarme tanto a pesar de mi rebeldía, sé que ni con todo el oro del mundo le puedo pagar tanto amor que me ha dado, mí mamy la mejor mujer de este mundo.

A mi esposa Lorena Iveth García Méndez por ser mi compañera y cómplice en esta vida, gracias porque sin tu apoyo esto no hubiera sido posible, este título tú lo mereces más que yo, eres una gran esposa, a veces pienso que no te merezco, me apoyaste desde que decidí volver a estudiar y te has mantenido firme en el camino, te admiro mucho, te amo mucho.

A mi príncipe Fernando Jireh Guevara García por ser uno de los motores de mi vida, se que todavía no sabes leer muy bien (pues tienes 4 años), pero algún día quiero que leas este texto, y veas que desde que te vi por primera vez en el quirófano saliendo de la panza de tu mamá te amé como a nadie en este mundo. Comúnmente los padres quieren que los hijos sigan su ejemplo, en este caso yo no, no quiero que seas como yo, quiero que seas una mejor persona, un mejor ser humano, quiero que me superes en todos los aspectos, pero sobre todo, quiero que seas feliz en tú vida. Sabes que te voy a apoyar en todo y haré hasta lo imposible para que nunca te falte nada, en mí tienes a tu mejor amigo que nunca te va a dejar y siempre te apoyaré en todo, quiero ser tu cómplice de aventuras. Este sentimiento de tener un varón en la familia no tiene precio, daría la vida por ti sin pensarlo Fer. Este título de maestría en ciencias es para ti hijo, pero el mejor título que la vida me puede dar es el de ser tu padre. Lo mejor de esta maestría es que me dió la oportunidad de llevarte a la escuela cada día y es algo que me fascinó, verte entrar a tu salón de clases y ver como aprendías es lo mejor que me pudo haber pasado, cuando me cantaste la canción de “hoy quiero decirte papá”, en el festival del día del padre me sacaron las lágrimas, (es un secreto, no se lo digas a nadie). Espero algún día estés orgulloso de mí como yo lo estoy de mi padre. Te amo mucho Jireh, nunca lo olvides.

A mi princesa Gloria Carolina Guevara Vázquez por ser uno de los motores de mi vida. Princesita estoy en deuda contigo, ni con todo el oro del mundo puedo resarcir el tiempo que no he pasado contigo. Desde que supé que ibas a ser niña te espere con muchas ansias, a pesar de mi corta edad cuando te tuve, supe que eras lo mejor que me pudo haber pasado, cuando te vi por primera vez hace 15 años me di cuenta que en mi vida lo más importante no era yo, sino tú hermosa. Me esforcé cada día para ser un buen padre, yo te cuidaba mientras tu mamá se iba a la universidad, y no me importó dejar la fiesta, los amigos y todo lo que un joven de 18 años tiene en ese momento de su vida, porque me la pasaba muy bien cuidándote. Desgraciadamente pasaron cosas que nos fueron alejando poco a poco, no culpó a nada ni a nadie por eso, pero si hay que echarle la culpa a alguien que

sea a mí, un poco de orgullo, de rutina diaria, en fin de todo un poco. Agradezco a Dios por haberme dado una hija como tú princesa, eres una gran persona, una gran mujer, definitivamente eres mejor que yo. Este título de maestría en ciencias es para ti princesa, una de las razones por las que decidí volver a estudiar fue para que te sintieras orgullosa de mí, te amo tanto Carito, eres lo mejor que me ha pasado. Estoy tan lejos de ser un buen padre o quizás de ser un padre, pero este lazo biológico que nos une es más fuerte que el acero. Tú y yo somos muy parecidos, en relación a que no nos gusta mucho demostrar afecto, pero yo sé que me amas igual que yo a ti.

A mis hermanos Cristian, Verónica e Ivonne Guevara Romero que me han apoyado en todo, ustedes han sido parte fundamental en mi vida, ustedes han sido mi modelo a seguir, ustedes me han ayudado a salir adelante cuando he pasado por momentos difíciles, son parte de este logro, los amo a los tres, sé que siempre puedo contar con ustedes y ustedes conmigo. Este título va para ustedes.

A mis compañeros y amigos de generación, Rossio Delgado Carreño, Ulises Rivera Flores y Carlos Iglesias Forns, gracias por sus consejos cuando todo parecía ir mal, por su apoyo moral, gracias por todas esas experiencias que vivimos juntos, las guardo en mi mente y en mi corazón. De todo corazón espero que se cumplan sus sueños y espero volver a verlos, aquí en Monterrey siempre van a tener a un amigo.

A mis grandes amigos de generaciones anteriores y posteriores, Nibardo, Checo, Alan, Jonhy, Alejo, Vanessa, Fong, Holman y Mario, gracias por su amistad, consejos, y apoyo moral, hicieron mi estancia en la maestría muy placentera, nos la pasamos muy bien, espero verlos pronto.

A mis amigos Mayra, Cristian (el parce), Damián, Eder, Ricardo, Cecy, Sori, Guille, Liz, Ulloa, Victor, Lalo, Freddy, Rua, Toño, Luis, Andrés, Brayan, Odlan, Briz, Nory, Jorge, gracias por su amistad, me llevo un recuerdo y una experiencia de cada uno de ustedes.

Gracias al Dr. Fausto Sánchez Cruz y al Dr. Simón Martínez Martínez por aceptarme en el posgrado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación

en Energías Térmica y Renovable, y por hacer posible que este programa tenga una infraestructura de alta calidad y nos permita a los estudiantes aprender con los mejores equipos.

A todo el personal docente del GETR (Grupo de energías térmicas y renovables) por sus enseñanzas, gracias al Dr. Óscar Alejandro de la Garza de León por permitirme trabajar con él y guiarme en la realización de esta tesis, al M.C. Miguel García Yera por todo su apoyo en mi trabajo de tesis, a mis profesores el M.C. Guadalupe Cedillo, M.C. Said Zamora, M.C. Jaime Armendáriz, Dr. Santos Méndez, Dr. Daniel de la Rosa, Dr. Arturo Morales, Dr. Héctor Flores y al M.C. Hugo Ramírez, mucha gracias a todos por enseñarme y transmitirme parte de su conocimiento.

Gracias a la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), por ser mi *alma matter* y a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME), me siento muy orgulloSO de pertenecer a estas dos instituciones que tienen una calidad Internacional. Muchas gracias por los apoyos económicos, y de infraestructura para llevar a cabo investigaciones de alto nivel como la que se presenta a continuación.

Muchas Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) del Gobierno de México por la financiación de mis estudios de posgrado (beca: 628933) en el programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovables, y por apoyar esta investigación a través del proyecto CB-239943 y del LaNDACBio (proyecto:293981). Gracias también a la Fundación DENSO Norteamérica (proyecto 1: *Impact of multiple-injection strategies on the injection process in a diesel common-rail system*; proyecto 2: *Influence of multiple-injection strategies on the injection process using direct-acting piezoelectric and solenoid diesel injectors*) por hacer posible la realización de la presente investigación.

Esta tesis fue desarrollada en los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) en el Grupo de Energías Térmica y Renovable (GETR) de la FIME-UANL.

DEDICATORIA

A Dios, que por su gracia he llegado hasta aquí.

A mis padres, que me han dado lo mejor de este mundo, su AMOR.

A Lore, por amarme y apoyarme en los momentos más difíciles de mi vida.

A Carito y Fer Jireh, por ser mis motores en esta vida.

A Cristian, Vero e Ivonne, por apoyarme en todo momento.

A Ale y Brenda, por ser mis sobrinas consentidas.

A Robertín, por ser el nuevo integrante de la familia.

“Todo lo puedo en Cristo que me fortalece”

Filipenses 4:13

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	IV
Dedicatoria	VIII
Nomenclatura	XXII
Resumen	XXVI
1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Antecedentes	8
2. Planteamiento de la tesis	16
2.1. Hipótesis	17
2.2. Objetivos	17
2.2.1. Objetivo general	17
2.2.2. Objetivos específicos	17
2.3. Metodología general de la tesis	18

2.3.1. Definición de los combustibles	18
2.3.2. Obtención de las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiésel	19
2.3.3. Caracterización de los parámetros macroscópicos del chorro de combustible líquido	20
2.3.4. Análisis de las imágenes de longitud líquida	20
2.3.5. Análisis de los resultados obtenidos	20
3. Marco teórico sobre el proceso de inyección diésel	21
3.1. Fundamentos del proceso de inyección en un motor de encendido por compresión	22
3.1.1. Sistema de inyección diésel	22
3.1.2. Tipos de sistemas de inyección directa	24
3.1.3. Sistema de inyección diésel common-rail	24
3.1.4. Inyectores diésel	27
3.1.5. Toberas de inyección	31
3.1.6. Tasa de inyección	33
3.2. Descripción general del chorro diésel	36
3.2.1. Atomización y coalescencia	36
3.2.2. Evaporación y mezcla	41
3.3. Parámetros macroscópicos del chorro diésel líquido	42

3.4. Principales propiedades físicas que influyen en las características del chorro diésel líquido	46
3.5. Estrategias de inyección múltiple	48
4. Herramientas teóricas y experimentales para el estudio	51
4.1. Instalación experimental: Maqueta de visualización a volumen constante.	52
4.1.1. Cámara de visualización a volumen constante	53
4.1.2. Sistema de inyección diésel common-rail	54
4.2. Técnica óptica: Iluminación directa por dispersión MIE	57
4.3. Obtención de la relación píxel/mm	59
4.4. Código para el procesamiento de las imágenes del chorro líquido . . .	60
4.5. Caracterización fisicoquímica de los combustibles objeto de estudio .	62
4.5.1. Método de destilación de acuerdo a la norma ASTM D86-04 .	62
4.5.2. Viscosidad cinemática	64
4.5.3. Tensión superficial	66
4.5.4. Densidad	66
4.5.5. Método de la gravedad específica ASTM D1298-99	67
5. Influencia de las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiesel sobre los parámetros macroscópicos del chorro líquido de combustible	69
5.1. Propiedades físicas de los combustibles	70

5.2. Evolución temporal del chorro líquido de combustible	74
5.3. Efecto de las propiedades físicas de los combustibles en la penetración del chorro líquido	77
5.4. Efecto de las propiedades físicas de los combustibles sobre el ángulo del chorro líquido	82
5.5. Efecto de las propiedades físicas de los combustibles sobre el área del chorro líquido	86
5.6. Conclusiones	91
6. Efectos de las propiedades físicas del combustible sobre los parámetros macroscópicos del chorro líquido de combustible bajo una es- trategia de inyección piloto	94
6.1. Evolución temporal del chorro líquido de combustible bajo una es- trategia de inyección piloto para el diésel y la mezcla binaria B10	96
6.2. Efecto de la estrategia de inyección piloto sobre los parámetros ma- croscópicos del chorro líquido (i.e. penetración, ángulo, y área) utili- zando el combustible diésel de referencia	99
6.3. Efecto de las propiedades físicas de la mezcla binaria diésel-biodiesel B10 bajo una estrategia de inyección piloto	103
6.4. Conclusiones	109
7. Conclusiones y trabajos futuros	111
7.1. Conclusiones	112
7.2. Trabajos futuros	115

Referencias	117
A. Puesta en operación de un amplificador de potencia para controlar inyectores diésel de tipo solenoide (GENOTEC)	126
A.1. Objetivo	127
A.2. Introducción	127
A.3. Descripción del tablero GENOTEC	128
A.4. Configuración y operación del programa	133
A.4.1. Barra del menú	133
A.4.2. Barra de símbolos	136
A.4.3. Ventana de mensajes	137
A.4.4. Barra de estatus de comunicación	137
A.5. Ejemplo de configuración del software	137
A.6. Conclusiones	143

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Consumo total mundial de energía por sectores.	2
1.2. Proyección del parque vehicular de México a 2030.	4
1.3. Evolución de la norma EURO.	5
1.4. Cronología de las normas de emisión de vehículos pesados adoptadas por país.	6
1.5. Producción de biodiesel en el mundo.	11
2.1. Esquema de la metodología general de la tesis.	18
3.1. Sistemas de inyección directa e indirecta.	23
3.2. Sistema de inyección diésel common-rail.	26
3.3. Elementos de un inyector diésel tipo solenoide y variables de funcio- namiento para una estrategia de inyección piloto.	28
3.4. Principio de funcionamiento de un inyector diésel tipo solenoide. . . .	29
3.5. Elementos de un inyector diésel tipo piezoeléctrico.	30
3.6. Toberas tipo saco y VCO.	31
3.7. Parámetros geométricos del orificio de una tobera de inyección.	32

3.8. Tasímetro.	33
3.9. Regímenes de atomización.	37
3.10. Morfología externa de un chorro diésel.	42
3.11. Estrategias de inyección múltiple. a) Estrategia de inyección piloto, b) estrategia de post-inyección, c) estrategia de inyección partida. . .	48
3.12. Esquema de los diferentes parámetros que entran en juego a la hora de definir una estrategia de inyección múltiple.	50
4.1. Maqueta de visualización a volumen constante.	52
4.2. Cámara de visualización a volumen constante.	53
4.3. Esquema del sistema de inyección diésel common-rail.	55
4.4. Técnica óptica: Iluminación directa por dispersión MIE.	58
4.5. Imágen obtenida para determinar la relación píxel-mm.	60
4.6. Imágen procesada del chorro líquido de combustible.	61
4.7. Componentes para realizar la destilación a nivel laboratorio.	64
4.8. Obtención de la gravedad específica.	68
5.1. Curvas de destilación obtenidas con base en la Norma ASTM D86-04, para el diésel y las mezclas binarias B05, B10 y B20.	70
5.2. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro líqui- do de combustible para un nivel de P_{rail} de 1300, un nivel de P_{back} de 60 bar, y un tiempo de energización de 1.5 ms para los combustibles estudiados. a) penetración, b) ángulo y c) área del chorro.	76

5.3. Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre la penetración del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 40 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.	79
5.4. Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre la penetración del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 50 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.	80
5.5. Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre la penetración del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 60 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.	81
5.6. Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre el ángulo del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 40 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.	83
5.7. Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre el ángulo del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 50 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.	84
5.8. Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre el ángulo del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 60 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.	85

5.9. Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre el área del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 40 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.	87
5.10. Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre el área del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 50 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.	88
5.11. Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre el área del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 60 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.	89
6.1. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro líquido del diésel, específicamente, a) penetración, b) ángulo, y c) área del chorro líquido de combustible.	97
6.2. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro líquido de la mezcla binaria diésel-biodiesel B10, específicamente, a) penetración, b) ángulo, y c) área del chorro líquido de combustible. . . .	98
6.3. Evolución temporal de la penetración del chorro líquido correspondiente a los cuatro casos de iso-tiempo para el diésel, y diferentes dwell time, concretamente, a) 1.5 ms, b) 2.0 ms, y c) 3.5 ms.	100
6.4. Evolución temporal del ángulo del chorro líquido correspondiente a los cuatro casos de iso-tiempo para el diésel, y diferentes dwell time, concretamente, a) 1.5 ms, b) 2.0 ms, y c) 3.5 ms.	101

6.5. Evolución temporal del área del chorro líquido correspondiente a los cuatro casos de iso-tiempo para el diésel, y diferentes dwell time, concretamente, a) 1.5 ms, b) 2.0 ms, y c) 3.5 ms.	102
6.6. Evolución temporal de la penetración del chorro líquido correspondiente a los cuatro casos de iso-tiempo para la mezcla binaria diésel-biodiesel B10, y diferentes dwell time, concretamente, a) 1.5 ms, b) 2.0 ms, y c) 3.5 ms.	104
6.7. Evolución temporal del ángulo del chorro líquido correspondiente a los cuatro casos de iso-tiempo para la mezcla binaria diésel-biodiesel B10, y diferentes dwell time, concretamente, a) 1.5 ms, b) 2.0 ms, y c) 3.5 ms.	105
6.8. Evolución temporal del área del chorro líquido correspondiente a los cuatro casos de iso-tiempo para la mezcla binaria diésel-biodiesel B10, y diferentes dwell time, concretamente, a) 1.5 ms, b) 2.0 ms, y c) 3.5 ms.	107
6.9. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro líquido correspondiente a los cuatro casos de iso-tiempo para el diésel y la mezcla binaria diésel-biodiesel B10, concretamente, a) penetración, b) ángulo, y c) área.	108
A.1. Amplificador de potencia para controlar inyectores diésel de tipo solenoide (GENOTEC).	127
A.2. Parte posterior del equipo GENOTEC.	128
A.3. Primera sección	128
A.4. Segunda sección	129
A.5. Tercera sección	130

A.6. Cuarta sección	131
A.7. Pulsos TTL para el puerto de Trigger/Gate.	132
A.8. Barra del menú.	134
A.9. File menú.	134
A.10.Edit menú.	134
A.11.Transmit menú.	135
A.12.Language menú.	136
A.13.Barra de símbolos.	136
A.14.Parámetros para el perfil 1.	138
A.15.Parámetros para el perfil 2.	139
A.16.Duración de pulsos.	140
A.17.Visualización de pulsos.	141
A.18.Perfil de pulsos eléctricos obtenidos en un osciloscopio.	141
A.19.Parámetros de amplificadores.	142

ÍNDICE DE TABLAS

1.1. Consumo final total de energía en México.	3
1.2. Emisiones de gases de efecto invernadero.	4
4.1. Componentes del sistema de inyección diésel common-rail.	56
5.1. Propiedades físicas de los combustibles objeto de estudio.	71
5.2. Propiedades físicas experimentales de los combustibles objeto de estudio.	72
5.3. Condiciones de operación representativas de un sistema de inyección diésel common-rail.	74
5.4. Matriz de experimentos para el estudio de la influencia de las pro- piedades físicas de las mezclas diésel-biodiesel sobre los parámetros macroscópicos del chorro de combustible líquido, bajo una inyección simple.	75
5.5. Parámetros macroscópicos del chorro líquido de la mezcla binaria B10 con respecto al diésel, bajo un nivel de P_{rail} de 1300 bar, y un nivel de P_{back} de 60 bar, para los tres iso-tiempos estudiados.	90

6.1. Matriz de experimentos para el estudio de la influencia de las propiedades físicas de la mezcla binaria diésel-biodiesel B10 sobre los parámetros macroscópicos del chorro de combustible líquido, bajo una estrategia de inyección piloto.	96
--	----

NOMENCLATURA

Siglas

<i>MP</i>	—	Material particulado.
<i>EPA</i>	—	Agencia de Protección Ambiental (<i>Environmental Protection Agency</i>).
<i>MCI</i>	—	Motores de Combustión Interna.
<i>MEC</i>	—	Motores de Encendido por Compresión.
<i>DME</i>	—	Dimetiléter (<i>Dimethyl Ether</i>).
<i>IMEP</i>	—	Presión media efectiva (<i>Mean Effective Pressure</i>).
<i>EGR</i>	—	Recirculación de gases de escape (<i>Exhaust Gas Recirculation</i>).
<i>CP</i>	—	Punto de nube (<i>Cloud Point</i>).
<i>PP</i>	—	Punto de escurrimiento (<i>Pour Point</i>).
<i>LHV</i>	—	Poder calorífico inferior (<i>Low Heat Value</i>).
<i>ECU</i>	—	Unidad de control electrónica (<i>Electronic Control Unit</i>).
<i>VCO</i>	—	Tipo de tobera (<i>Valve Covered Orifice</i>).
<i>PMS</i>	—	Punto muerto superior.
<i>API</i>	—	Gravedad API.
<i>IBP</i>	—	Punto inicial de ebullición (<i>Initial Boiling Point</i>).
<i>FBP</i>	—	Punto final de ebullición (<i>Final Boiling Point</i>).
<i>ASOI</i>	—	Tiempo despues del inicio de la inyección (<i>After Start of Injection</i>).
<i>LDA</i>	—	Anemometría de Láser Doppler (<i>Laser Dopler Anemometry</i>).
<i>PDA</i>	—	Anemometría de Fase Doppler (<i>Phase Dopler Anemometry</i>).

Latinos

Gg	—	Gigagramo.
RPM	—	Revoluciones por minuto.
MPa	—	MegaPascuales.
d_i	—	Diámetro de entrada.
d_0	—	Diámetro de salida.
L_0	—	Longitud.
r_0	—	Radio de entrada.
$kfactor$	—	Parámetro para obtener la conicidad del orificio de la tobera.
A_t	—	Área transversal.
\dot{m}	—	Flujo másico.
C_d	—	Coeficiente de descarga.
t	—	Tiempo.
T_g	—	Temperatura del gas.
K	—	Kelvin.
$S(t)$	—	Correlación para encontrar la penetración del chorro líquido.
A	—	Constante que debe ser ajustada dependiendo de la geometría del orificio.
F_t	—	Función obtenida de manera analítica por Taylor.
d_8	—	Diámetro del saco de la tobera.
L	—	Litro.
m	—	Metro.
Hz	—	Hertz.
P_{rail}	—	Presión de inyección.
P_{back}	—	Contrapresión.
W	—	Pulso eléctrico.
N	—	Frecuencia de inyección.
mm	—	milímetros.
ml	—	mililitros.
cm	—	Centímetros.

T_c	—	Temperatura corregida en °C.
T	—	Lectura de la temperatura observada en °C al momento de la destilación .
P	—	Presión barométrica durante la realización del proceso de destilación en kPa.
K	—	Factor de caracterización de Watson.
GE	—	Gravedad específica 60/60 °F.
$VABP$	—	Punto de ebullición volúmetrico.
M_eABP	—	Punto de ebullición promedio en grados Rankine.
M	—	Peso molecular.
GET	—	Lectura de la gravedad específica a la temperatura observada en °C.
ms	—	Milisegundos.

Letras griegas

ΔP	—	Diferencia de presión.
α	—	Velocidad del sonido.
ρ_f	—	Densidad del combustible.
Δv	—	Diferencia de velocidad del flujo.
θ	—	Ángulo de apertura del chorro líquido.
ρ_g	—	Densidad del gas.
ϕ_o	—	Diámetro de la tobera.
σ	—	Tensión superficial del combustible.
μ_f	—	Viscosidad dinámica del combustible.
v_{eff}	—	Velocidad efectiva de la inyección.
ν_{40}	—	Viscosidad cinemática a 40°C.
ρ_{20}	—	Densidad a 20°C.

Fórmulas químicas

CO_2	—	Dióxido de Carbono.
CO	—	Monóxido de Carbono.

NO_x — Óxidos de Nitrógeno.

CH_4 — Metano.

N_2O — Óxido de Nitrógeno.

HC — Hidrocarburos.

SO_2 — Dióxido de Azufre.

RESUMEN

Una de las principales fuentes de emisiones contaminantes que provocan el efecto invernadero en nuestro planeta, es la quema de combustibles fósiles por parte del sector del transporte, más específicamente, los motores de combustión interna (MCI). En respuesta a este panorama, se buscan fuentes de energía alternativa con el propósito de disminuir dichas emisiones y dejar un poco de lado la dependencia del combustible fósil.

Una de las alternativas para la reducción de emisiones contaminantes en los motores Diesel es el uso del biodiesel, ya que es un combustible que produce energía eficiente y limpia además de ser renovable ya que se puede obtener de plantas, semillas, grasas animales y de aceites vegetales nuevos o usados. El biodiesel tiene bajas emisiones de hollín debido a su alto número de cetano. Otra de las técnicas utilizadas para la reducción de emisiones contaminantes (NO_x) son las estrategias de inyección múltiple, las cuales consisten en introducir múltiples inyecciones de combustible dentro del periodo de tiempo que dura un evento de inyección.

Por tal motivo en el presente trabajo se utilizarán diferentes mezclas binarias diésel-biodiesel (i.e. B05, B10 y B20), además del diésel de referencia, con el objetivo de poder ver el impacto de las propiedades físicas de las mezclas binarias en el proceso de mezcla, específicamente, en los parámetros macroscópicos como los son el área, el ángulo y la penetración, bajo una inyección simple y bajo la estrategia de inyección piloto.

Para alcanzar el objetivo anteriormente descrito, primero se caracterizaron los combustible objeto de estudio, es decir, se determinaron las principales propiedades físicas que influyen sobre los parámetros macroscópicos (i.e. densidad, viscosidad y tensión superficial). Seguidamente se inyectaron los combustibles en la maqueta de visualización a volumen constante; el evento de inyección fue grabado con una cámara de alta resolución, para posteriormente procesar las imágenes mediante un código propio en Matlab.

Para estudiar la influencia de las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiésel, bajo una inyección simple, las condiciones de operación fueron tres diferentes niveles de P_{rail} , 500, 800, y 1300 bar, y tres niveles de P_{back} , 40, 50, y 60 bar, respectivamente. El tiempo de energización del inyector fue de 1.5 ms.

Los resultados obtenidos fueron que a mayor densidad del combustible, mayores son sus niveles de penetración, conforme aumenta la viscosidad y tensión superficial los valores de ángulo y área van disminuyendo, afectando negativamente el proceso de mezcla. Al comparar de manera global las diferentes mezclas binarias, se observó que bajo un nivel de P_{rail} de 1300 bar, y un nivel de P_{back} de 60 bar la mezcla binaria B10 tiene un proceso de mezcla similar al del diésel.

Posteriormente, para estudiar la influencia de las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiésel, bajo una estrategia de inyección piloto, primero se analizó la influencia de la propia inyección piloto sobre el diésel, bajo un nivel de P_{rail} de 1300 bar, un nivel de P_{back} de 60 bar y tres diferentes niveles de dwell time, 1.5, 2.0 y 3.5 ms respectivamente. Seguidamente, bajo estas mismas condiciones de operación, se analizó la mezcla binaria B10. Cabe mencionar que la mezcla binaria B10 se seleccionó por que fue la que se comportó de manera similar al diésel, bajo estas condiciones de operación en una inyección simple.

Los resultados que se obtuvieron fueron que para un dwell time de 1.5 ms, la inyección piloto influye negativamente sobre la principal, debido a que genera mayores valores de penetración en la inyección principal, tanto para el diésel, como

para la mezcla binaria B10, afectando de manera negativa el proceso de mezcla. Mientras que para los dwell time de 2.0 y 3.5 ms, la inyección va dejando de tener influencia sobre la principal, para los dos combustibles objeto de estudio.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la motivación para llevar a cabo el presente estudio, además de los antecedentes que conciernen al campo del conocimiento que enmarcan el presente estudio.

1.1 MOTIVACIÓN

En la actualidad uno de los grandes problemas a nivel mundial es el cambio climático, éste se debe principalmente al calentamiento global que se genera por el fenómeno meteorológico denominado efecto invernadero, dicho fenómeno se genera de manera natural ya que permite mantener la temperatura de la Tierra en condiciones habitables reteniendo cierta parte de la energía proveniente del sol. En las últimas décadas el ser humano ha contribuido de manera importante en la generación de gases de efecto invernadero, aumentando así el calentamiento global de la Tierra y teniendo como consecuencia el derretimiento de los polos, fenómenos meteorológicos extremos, entre otras [1]. Dentro de la actividad de quema de combustibles fósiles por parte de los seres humanos, una de las de mayor afectación para el medio ambiente es el sector del transporte. Como se puede observar en la Figura 1.1 [2], el área del transporte está a la par con el sector industrial en el consumo total de energía a nivel mundial, siendo por ende los sectores que generan más gases de efecto invernadero.

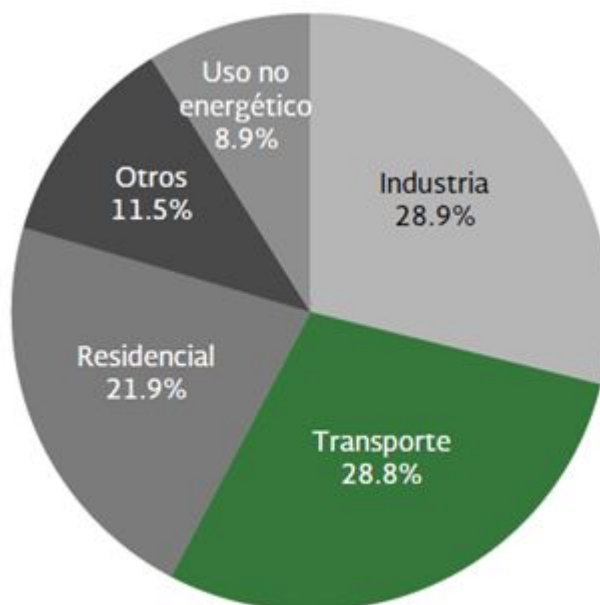


Figura 1.1: Consumo total mundial de energía por sectores.

En México del consumo energético final total, el sector del transporte es el que más energía consume en sus procesos de combustión y actividades económicas para satisfacción de la sociedad con un consumo de 2,484.95 Petajoules en el año del 2016, como se observa en la Tabla 1.1 [2].

Tabla 1.1: Consumo final total de energía en México.

	2015	2016	Variación porcentual (%) 2016/2015	Estructura porcentual (%) 2016
Consumo final total	5,283.13	5,479.26	3.71	100.0
Consumo no energético total	188.39	173.69	-7.80	3.2
Petroquímica de Pemex	113.22	99.21	-12.38	1.8
Otras ramas	75.17	74.48	-0.91	1.4
Consumo energético total	5,094.74	5,305.57	4.14	96.8
Transporte	2,361.75	2,484.95	5.22	45.4
Industrial	1,601.84	1,680.79	4.93	30.7
Residencial, comercial y público	952.06	959.58	0.79	17.5
Agropecuario	179.09	180.26	0.65	3.3

Este gran consumo de energía se debe principalmente a que en la actualidad los vehículos son guiados por motores de combustión interna, los cuales necesitan combustible, principalmente hidrocarburos en la mayoría de los casos. El proceso de combustión que ocurre en este tipo de motores, donde el combustible que se quema es un hidrocarburo genera gases de escape producto de la oxidación del hidrocarburo, principalmente dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre y material particulado (MP). Estos gases repercuten negativamente en el medio ambiente ya que generan el efecto invernadero y también son perjudiciales para la salud [3].

Para el año del 2015 en México se registraron altas emisiones de gases de efecto invernadero por parte del sector del transporte, siendo el autotransporte el rubro de mayor generación en dióxido de carbono (CO_2) en la actividad de quema de combustibles como se puede observar en la Tabla 1.2 [4].

Tabla 1.2: Emisiones de gases de efecto invernadero.

Emisiones de gases de efecto invernadero (Gg en CO ₂ e) 2015	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
1.-Transporte	167,855.82	329.54	3,169.48
1a.-Aviación civil	6,238.15	1.20	45.53
1b.-Autotransporte	156,754.35	317.72	2,872.01
1c.-Ferrocarriles	2,238.66	3.57	232.90
1d.-Navegación marítima y fluvial	2,624.65	7.04	19.05

Aunado a esto, el parque vehicular dentro del territorio mexicano va cada vez más en aumento pues la tasa de motorización actual en México es de 6.32 % anual, mayor al crecimiento de la tasa demográfica, que es de 2.41 %. En la Figura 1.2 [5], se puede observar la proyección del parque vehicular en México, las estimaciones señalan que si esta tendencia continúa, en 2030, podría tenerse una flota vehicular de 70 millones de vehículos.

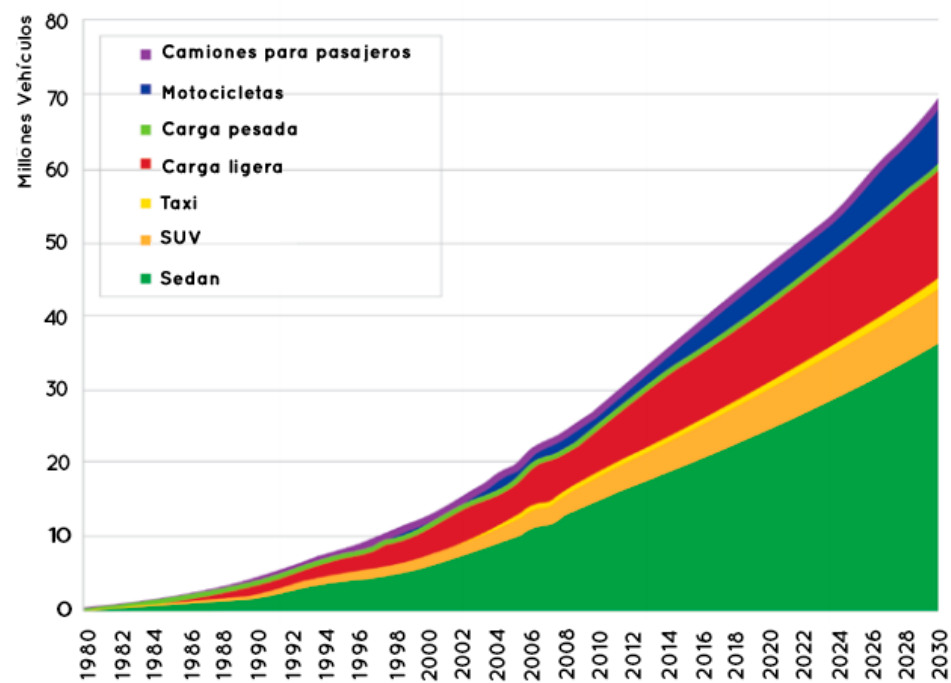


Figura 1.2: Proyección del parque vehicular de México a 2030.

Actualmente los distintos gobiernos para disminuir el problema de contaminación crean marcos de legislación para la reducción de los gases de escape a las emisiones mínimas posibles, este marco o normas cada vez van evolucionando y obligando a la industria automotriz a fabricar automóviles que contaminen en menor cantidad. Dentro de la unión europea en el año 1992 nacen las normas EURO y desde su creación han ido evolucionando, de tal manera que cada vez son menos las cantidades de emisiones contaminantes que debe producir un coche, como se logra observar en la Figura 1.3, actualmente la norma EURO que rige en la Unión Europea es la EURO VI.

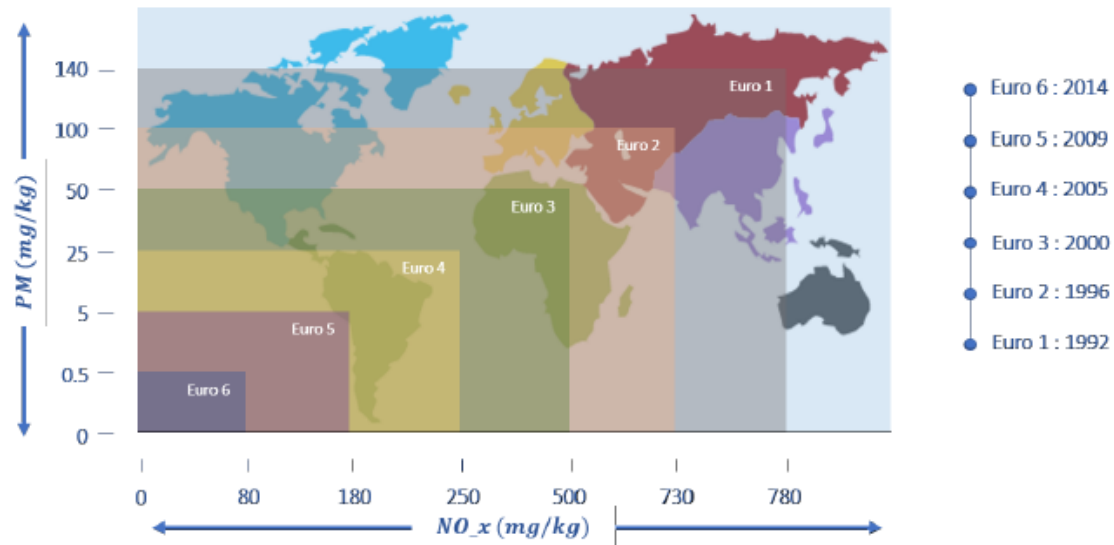


Figura 1.3: Evolución de la norma EURO.

Estados Unidos también cuentan con su marco de legislación para la reducción de emisiones contaminantes, se encuentran las normas EPA (*Environmental Protection Agency*, por sus siglas en inglés), donde actualmente la que rige a ese país es la EPA 2010. En México existen normas ambientales de la SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) que regulan el nivel de emisiones contaminantes de los distintos tipos de vehículos, y la cantidad de emisiones generadas por estos mismos, como por ejemplo la NOM-042-SEMARNAT-2003 y la NOM-044-SEMARNAT-2017.

En la Figura 1.4 [6], se muestra la cronología de las normas de emisiones de vehículos pesados de varios países de América Latina y otros países del mundo y su equivalencia con las normas EURO y EPA.

Grupo	Región	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Otros mercados	Estados Unidos y Canadá	EPA 2010						
	UE	Euro VI						
	Japón	PNLTES						
	Corea del Sur	Euro V	Euro VI					
	Australia	Euro V/EPA 2007/JE05						
	Rusia	Euro IV		Euro V				
	China	China IV						
	India	Bharata III						
América Latina	México	EPA 2004/Euro IV				EPA 2010/Euro VI		
	Brasil	P-7						
	Argentina	Euro IV		Euro V				
	Chile	Euro IV		Euro V				
	Colombia	Euro II	Euro IV					
	Perú	Euro III						
	Uruguay	Euro III						
	Ecuador	EPA 94/Euro II						
	Costa Rica	Euro I						
	Venezuela	EPA 88/Euro I						
Equivalencia Euro								
	Pre-Euro II	II	III	IV	V	VI		

Figura 1.4: Cronología de las normas de emisión de vehículos pesados adoptadas por país.

Hoy en día existen diferentes tecnologías para la reducción de emisiones contaminantes, y sin embargo no han sido suficientes para alcanzar los niveles óptimos propuestos por las distintas normas, todo esto aunado a los altos precio del petroleo y las limitaciones de las reservas de este combustible fósil, que es necesario mirar hacia otras fuentes de energías más limpias y renovables.

Una de las principales alternativas para la reducción de emisiones contaminantes, y dejar un poco la dependencia de los combustibles fósiles son el uso de biocombustibles para motores de combustión interna alternativos (MCIA), dado que los biocombustibles son derivados de productos naturales como lo son plantas, semillas, frutos, así como también de grasas animales. Los biocombustibles pueden llegar a ser utilizados como combustible puro, o mezclado con diésel en sustitución de los

productos derivados del petróleo [7]. En muchos países las gasolinas y diésel que se venden comercialmente ya cuentan con un porcentaje de bioetanol y biodiesel, lo que ayuda en gran medida a proteger el medio ambiente.

Los motores de encendido por compresión (MEC) son mayoría en el sector transporte, ya que son más usados por el transporte de uso comercial y agrícola, debido a su mayor eficiencia. Por tal motivo, actualmente se realizan grandes esfuerzos en la producción y uso de biodiesel, para amortiguar el consumo del diésel. El biodiesel tiene propiedades físicas y químicas muy similares al diésel por lo que se ha demostrado que al inyectar biodiesel en un motor de encendido por compresión mejora su rendimiento y reduce las emisiones contaminantes [8].

El biodiesel se puede generar a partir de diferentes materias primas como lo son aceites usados de cocina y de grasas animales o vegetales, por lo que se considera una energía limpia y renovable. Algunas de las ventajas del uso del biodiesel son las siguientes:

- Aprovechamiento de residuos.
- Gran poder lubricante.
- Es biodegradable.
- Reducción de emisiones de monóxido de carbono (CO).
- Alto índice de cetano.

Dentro de las desventajas del uso de biodiesel se encuentran las siguientes:

- Punto de congelación alto.
- Menor contenido energético.
- Altos costos de producción.
- Daños en los componentes del motor.

1.2 ANTECEDENTES

El ingeniero de origen francés y nacionalizado alemán Rudolf Diesel, presentó en el año de 1892 la patente del motor que actualmente lleva su nombre en la oficina de patentes de la ciudad de Berlín, Alemania junto con escrito que decía “...*el émbolo comprime aire puro en un cilindro, de modo que la temperatura resultante de la compresión es mucho mayor que la temperatura de inflamación del combustible que se ha de emplear. Después de la compresión y a partir del punto muerto, se efectúa la introducción gradual del combustible...*” , esta frase describe de manera perfecta la gran diferencia entre un motor de gasolina y un motor Diesel [9].

El transporte marítimo, comercial y la maquinaria pesada utilizan motores Diesel debido a que tienen gran ventaja sobre los motores de gasolina debido a que generan una mayor potencia, mejor rendimiento del combustible, presentan menos averías, el tiempo de vida es mayor y presenta una mayor fiabilidad. Para el caso del transporte marítimo los gases de escape representan una de las principales causas de contaminación del aire en el mar [10] [11]. En general las emisiones contaminantes de los motores representan un grave riesgo para la salud humana, ya que pueden provocar cáncer de pulmón y muertes cardiopulmonares, bronquitis, neumonía, afecta el crecimiento del feto en mujeres embarazadas, problemas respiratorios, entre otras enfermedades [12].

Debido a esto día a día se buscan nuevas soluciones para la reducción de gases de escape de los motores Diesel, específicamente los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el material particulado, mejor conocido como hollín, ya que estos son los productos más característicos de este tipo de motores. Estas soluciones pueden ser de dos tipos:

- Soluciones activas.- Las cuales tratan de evitar la formación de emisiones contaminantes dentro de la cámara de combustión y éstas tienen que ver con modificaciones al diseño del motor y sus componentes.

- Soluciones pasivas.- Se refieren a la eliminación o reducción de las emisiones contaminantes a la salida del motor, es decir, durante su salida en las líneas del escape hacia el medio ambiente, una vez que ya se formaron producto de la combustión dentro de la cámara de combustión.

La mayoría de las soluciones van dirigidas a reducir las temperaturas de la llama y a modificar el tiempo de permanencia, y a mejorar la formación del chorro de inyección en la cámara de combustión, ya que el comportamiento del chorro diésel caracteriza el proceso de mezcla, el cual está relacionado con el proceso de combustión y las emisiones contaminantes. Algunas de estas soluciones son las siguientes [13]:

- Modificación en la forma de la cámara de combustión para favorecer la turbulencia y por consecuencia el proceso de mezcla.
- Aumento en las presiones de inyección para que la atomización del chorro de combustible sea más fina y mejore el proceso de mezcla y evaporación.
- Recirculación de gases de escape para la reducción de (NO_x), sin embargo sólo se puede recircular un 50 % de los gases de escape.
- Enfriamiento del aire de admisión para reducir las temperaturas de la combustión.
- Combustión a baja temperatura, la cual se basa en aumentar la cantidad de combustible que se quema en la etapa premezclada.

Otra de las técnicas utilizadas para la reducción de emisiones contaminantes (NO_x) son las estrategias de inyección múltiple, las cuales consisten en introducir múltiples inyecciones de combustible dentro del periodo de tiempo que dura un evento de inyección. Park et al. [14], realizaron estudios empleando la inyección simple, la inyección doble y la inyección dividida, donde en estas dos últimas técnicas se inyecta la misma masa de combustibles para las dos inyecciones dentro del mismo evento, sólo variando el tiempo de la inyección cada 10° del cigueñal, la combustión

y las emisiones fueron analizadas mediante el código numérico KIVA-3V, el cual es muy usado para simular procesos de combustión, los resultados obtenidos muestran que las emisiones de NO_x con la técnica de inyección dividida son menores que con la inyección simple, la razón es por que se evita la combustión rápida formando una mezcla homogénea aire-combustible por un intervalo de inyección más largo, este estudio sugiere que la técnica de inyección piloto es más eficiente para la reducción de NO_x .

Myung Yoon Kim et al. [15], estudiaron el efecto de las estrategias de inyección múltiple en la reducción de emisiones de escape y el rendimiento de un motor alimentado por DME (Dimetiléter), todos los experimentos fueron a una velocidad del motor de 1500 RPM y a una presión de inyección de 50 MPa, las estrategias utilizadas fueron la inyección dividida, la inyección piloto, la inyección simple y una carga parcial premezclada, los resultados obtenidos fueron que la estrategia de inyección dividida reduce en un 74.5 % los NO_x a un ligero costo de la presión media efectiva (IMEP), la principal razón de esto es debido a que se reduce la temperatura y la presión de la combustión y retarda el evento de la combustión. La inyección piloto redujo en un 76.1 % los NO_x a un costo del 3.1 % de IMEP, además, la estrategia de inyección piloto demostró reducción simultánea de las emisiones de HC y CO.

Actualmente las reservas del petróleo corren el riesgo de ser agotadas, pues al ritmo del consumo que tenemos se prevé que se agote en aproximadamente 53 años. A medida que nos acercamos más a este límite el precio del petróleo va ir en aumento como ha pasado en los últimos años [16], por este motivo no sólo es necesario optimizar los motores combustión interna para la reducción de emisiones de escape, sino también buscar fuentes alternativas de energía como son los biocombustibles.

En los motores de encendido por compresión el biodiesel es una de los combustibles más prometedores ya que desde hace más de un siglo se contemplaba la idea del uso de este como combustible. El 10 de agosto de 1893, el ingeniero Rudolf Diesel patentó un nuevo modelo de motor de combustión interna que funcionaba con

aceite de cacahuete, invento que le permitió ganar el premio principal de la Feria Internacional de París en 1900. El biodiesel que conocemos actualmente es decir, el resultado de la transesterificación (método comúnmente utilizado para la producción de ésteres monoalquílicos de grasas y aceites vegetales) fue utilizado durante la segunda guerra mundial en Europa en los motores automotrices debido a la escasez del petróleo [17]; pero no fue sino hasta finales de la década de los 70's y principios de los 80's que la preocupación por los altos precios del petróleo promovió una extensa experimentación de la técnica de obtención de biodiesel de una gran variedad de aceites vegetales y grasas animales en la búsqueda de fuentes alternativas de energía [18, 19].

Actualmente la producción del biodiesel en el mundo va en aumento, como se muestra en la Figura 1.5 [20] desde 1991 y hasta el 2012, se ve claramente la demanda del biodiesel en el mercado mundial del combustible.

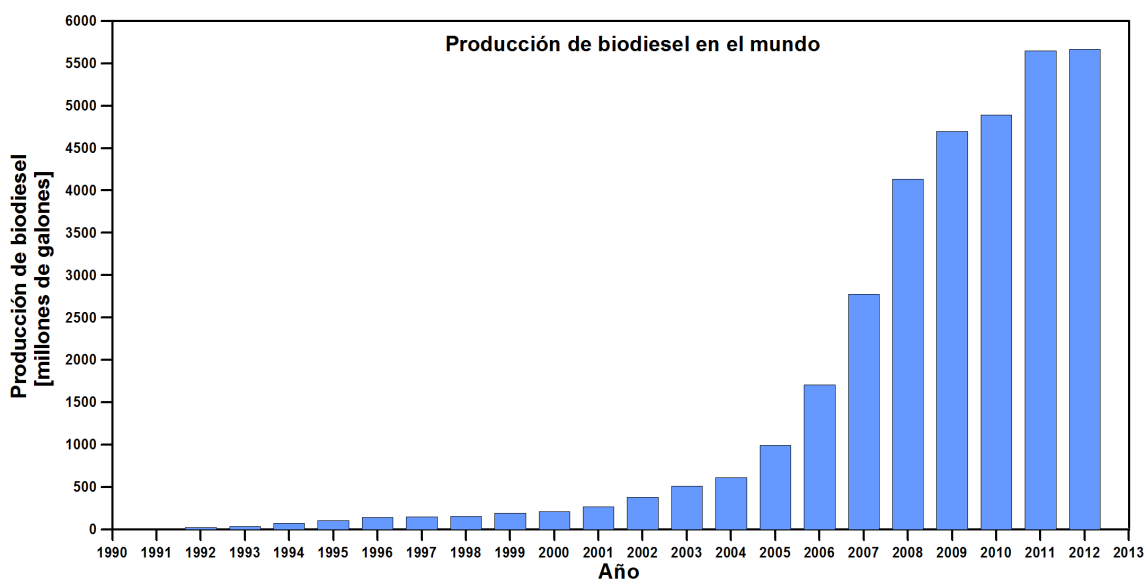


Figura 1.5: Producción de biodiesel en el mundo.

En México la opción económicamente más viable para la producción de biodiesel es de aceites usados y grasas, ya que la producción de aceites crudos no se ha podido sostener a costos competitivos. En el territorio mexicano se cuenta con una capacidad instalada de $4,182 \text{ m}^3/\text{a}$ que se encuentran operando o próximas a abrir.

El costo de la producción de biodiesel a partir de aceite usado en México es de 13.72 pesos por litro si la fábrica de biodiesel contrata a una empresa externa para que le provea el servicio de recolección de aceite usado. En cambio si la empresa productora de biodiesel asume el costo de la recolección del aceite usado, el costo de producción es de 11.10 pesos por litro. El costo de producción del biodiesel a partir de sebo de res es de entre 14.22 y 18.22 pesos por litro [21].

El biodiesel ha ganado popularidad como combustible alternativo debido a que es un combustible limpio producido a partir de recursos domésticos y renovables, se puede mezclar en cualquier proporción con el diésel, y es más amigable con el medio ambiente y menos tóxico que el diésel. Otra característica que hacen tan atractivo el uso de biodiesel es su alto número de Cetano, ya que esto genera bajas emisiones de hollín, y altas emisiones de (NO_x), éstas últimas debido a alta temperatura en la cámara de combustión [22]. Las altas emisiones de (NO_x) provocadas por el biodiesel pueden ser reducidas con la técnica EGR (*Exhaust Gas Recirculation*, por sus siglas en inglés). El biodiesel contiene gran contenido de oxígeno, además que cuando se mezcla con el diésel mejora la eficiencia mecánica del motor. Usando biodiesel en el motor también se reducen las emisiones de dióxido de azufre (SO_2), la cual es la principal causa de la lluvia ácida [23].

Otras de las características que hacen atractivo al biodiesel son sus propiedades físicas, ya que éstas son muy similares a las del diésel. La más importante es la viscosidad, ya que afecta la inyección del combustible, pero la viscosidad ligeramente alta del biodiesel sobre el diésel ayuda a la lubricidad de los motores Diesel [24]. La densidad es otra propiedad importante ya que a mayor densidad por parte del biodiesel se entrega ligeramente una cantidad de masa mayor en el proceso de inyección [25]. Otros dos parámetros importantes para la aplicación de bajas temperaturas del combustible es el cloud point (CP) y pour point (PP). El cloud point es la temperatura a la cual se hace visible por primera vez cuando es enfriado, y el pour point es la temperatura más baja a la que puede fluir el combustible. El biodiesel tiene mayor CP y PP que el diésel convencional [26]. Además de ser más seguro el biodiesel ya

que su punto de inflamación es superior a los 150 °C, muy superior comparado con el del diésel que es de 77 °C [27, 17].

Existen numerosas investigaciones que dejan ver el gran potencial del uso de biosiesel, Ingrid Lozada et al. [28], analizaron la factibilidad económica y ambiental de la producción y utilización de biodiesel de acetite de palma en mezclas B5 y B10 diésel-biodiesel para el sector del transporte mexicano. Donde los resultados arrojan que haciendo un buen uso de los recursos, el aceite de palma puede cubrir la demanda del sector del transporte con mezclas B10 del año 2016 al 2031. Durante este periodo las emisiones de material particulado y monóxido de carbono (CO) se reducirían en un 3.4 y 3.7 %, respectivamente. Adicionalmente, las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) se reducirían en un 7.6 %. Finalmente, las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) podrían alcanzar reducciones hasta de 148 millones de toneladas.

Orkun Özener et al. [29], estudiaron las características de la combustión, el rendimiento y las emisiones del combustible diésel convencional y las comparó con las del biodiesel producido a partir del aceite de soja y sus mezclas (B10, B20, B50). Las pruebas se realizaron en estado estable en un motor monocilindrico de inyección directa, los resultados experimentales indicaron que hubo una disminución del 1 % al 4 % en el torque, y un aumento en el consumo específico del combustible al freno del 2 % al 9 % esto debido al bajo valor calorífico (LHV) del biodiesel. Las emisiones de monóxido de carbono (CO) se redujeron en un rango de 28 % a 46 %, y los hidrocarburos totales se redujeron entre un 20 % y un 44 %. Estos resultados indican que el biodiesel se puede utilizar sin ningún tipo de modificación del motor.

Es de gran importancia conocer el proceso de inyección en un motor Diesel, ya que el proceso de atomización, evaporación y mezcla del aire con el combustible desempeñan un papel importante en el rendimiento del motor, la combustión y las emisiones contaminantes. El biodiesel tiene diferentes propiedades físicas en comparación con el diésel, por lo tanto varían las características del chorro de combustible como lo son la penetración, el ángulo y el área del chorro, y estos son determinantes para el proceso de mezcla aire-combustible [30, 31].

Recientes investigaciones han estudiado las características del chorro de diferentes combustibles, Hongzhan Xie et al. [32], investigaron las características macroscópicas del chorro de diferentes mezclas diésel-biodiesel, el biodiesel fue obtenido a partir de agua residual. Los experimentos fueron realizados a diferentes presiones de inyección y diferentes presiones en la cámara de volumen constante, se grabó el evento de inyección con una cámara de alta resolución y las imágenes obtenidas fueron procesadas en una computadora. Los resultados obtenidos fueron que con el aumento de la presión de inyección, la penetración, la velocidad, el área y el volumen del chorro aumentan. Con el aumento de la presión en cámara, la penetración y la velocidad del chorro disminuyeron mientras que el ángulo del chorro aumentó. Las propiedades físicas que más afectan las características del chorro son la viscosidad y la tensión superficial, ya que inhiben la ruptura del chorro líquido y la atomización del mismo; es decir, entre más porcentaje de biodiesel tenía la mezcla provoca una menor penetración y un menor ángulo.

Balaji Mohan et al. [33], estudiaron las características del chorro de combustible en el proceso de mezcla usando biodiesel de aceite usado de cocina en mezclas B20, B100 y diésel. Las características del chorro como la penetración, el ángulo, la velocidad y la morfología fueron estudiadas a altas presiones de inyección en una cámara de volumen constante. El evento de inyección se grabó con una cámara de alta resolución y las imágenes obtenidas fueron procesadas en un código en Matlab. Los resultados obtenidos fueron que la mezcla B100 obtuvo una mayor penetración y velocidad en comparación con la B20 y el diésel. La forma del chorro se ve afectada

por la cavitación dentro de los orificios de la tobera. El aumento de la presión en cámara mostró un incremento significativo en los ángulos del chorro para todos los combustibles.

Por todo lo expuesto anteriormente es necesario investigar más acerca de cómo influyen las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiesel sobre las características del chorro de combustible líquido sobre el proceso de mezcla.

CAPÍTULO 2

PLANTEAMIENTO DE LA TESIS

En este capítulo se presenta el planteamiento para llevar a cabo el presente estudio, específicamente, se expresa la hipótesis, se define el objetivo general y los objetivos específicos, y por último se describe una metodología general para llevar a cabo el presente trabajo de tesis.

2.1 HIPÓTESIS

Las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiesel influyen en el proceso de inyección diésel debido a que afectan a los parámetros macroscópicos del chorro de combustible, es decir a la penetración, el ángulo, y el área del chorro, adicionalmente, con una proporción de biodiesel en la mezcla binaria diésel-biodiesel se puede alcanzar un mismo comportamiento de los parámetros macroscópicos del chorro al que se tiene en el diésel, bajo condiciones de operación específicas.

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar la influencia de las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiesel (B05, B10 y B20) y el diésel de referencia sobre los parámetros macroscópicos del chorro de combustible líquido.

2.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para poder lograr el objetivo general de la presente investigación se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Definir el porcentaje de biodiesel en las mezclas binarias diésel-biodiesel.
- Obtener las propiedades físicas, específicamente, la densidad, viscosidad y tensión superficial, de las mezclas binarias diésel-biodiesel.
- Caracterizar los parámetros macroscópicos del chorro de combustible líquido,

es decir la penetración, el ángulo, y el área del mismo bajo una inyección simple.

- Caracterizar los parámetros macroscópicos del chorro de combustible líquido, es decir la penetración, el ángulo, y el área del mismo bajo una estrategia de inyección piloto.

Con el fin de alcanzar los objetivos previamente descritos se seguirá la siguiente metodología general.

2.3 METODOLOGÍA GENERAL DE LA TESIS

En la Figura 2.1, se muestra el esquema general de la metodología, la cual está compuesta de 5 fases, seguidamente se dan más detalles de cada una de éstas.

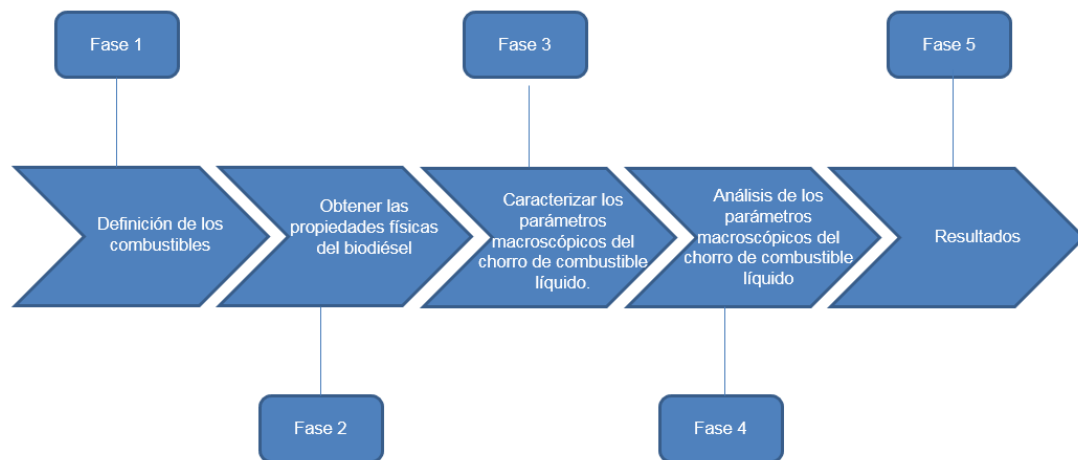


Figura 2.1: Esquema de la metodología general de la tesis.

2.3.1 DEFINICIÓN DE LOS COMBUSTIBLES

Actualmente existe una gran variedad de combustibles en el mercado, pero la situación medio ambiental global requiere de alternativas para la reducción de

emisiones contaminantes, una de ellas es el uso del biodiesel, el cual representa una gran oportunidad, y no sólo por lo que puede aportar el producto ya terminado como tal, el cual puede derivarse de diferentes materias primas, entre las cuales, se pueden destacar los productos naturales como las plantas, semillas, así como también de grasas animales o vegetales y de aceites residuales. Esta última materia prima hace que el costo de producción de biodiesel sea bajo, ésta generalmente representa el 80 % de su costo final [34, 35]. Debido a lo anterior los combustibles que se emplearán en el presente trabajo, será el biodiesel producido a partir del aceite residual de soya, el cual fue proporcionado por el Instituto Politécnico Nacional (IPN), como parte de la colaboración del proyecto de LaNDACBio, y el diésel como combustible de referencia, específicamente estos dos combustibles se mezclaron en las siguientes proporciones: B05 (95 % diésel y 5 % biodiesel), B10 (90 % diésel y 10 % biodiesel) y B20 (80 % diésel y 20 % biodiesel), con el objetivo de variar las propiedades físicas de los combustibles, para posteriormente estudiar la influencia de estas variaciones sobre los parámetros macroscópicos del chorro líquido de combustible, es decir, la penetración, el ángulo, y el área del mismo.

2.3.2 OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS MEZCLAS BINARIAS DIÉSEL-BIODIESEL

El biodiesel tiene diferentes propiedades físico-químicas que el diésel de referencia, por ejemplo tiene una mayor densidad, viscosidad, tensión superficial y concentración de oxígeno. Las propiedades antes mencionadas afectan directamente las características del chorro de combustible líquido. Por lo tanto, se determinarán las propiedades físicas (i.e. densidad, viscosidad, y tensión superficial) de las mezclas binarias diésel-biodiesel objeto de estudio.

2.3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO

Una vez que se han determinado las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiésel objeto de estudio, seguidamente se procederá a caracterizar los parámetros macroscópicos del chorro de combustible líquido (i.e. penetración, ángulo, y área del chorro) empleando las mezclas binarias diésel-biodiesel objeto de estudio. Más detalles sobre las condiciones de operación que se emplearán en los experimentos se describen en los Capítulos 5 y 6.

2.3.4 ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES DE LONGITUD LÍQUIDA

Con el fin de estudiar la influencia de las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiesel sobre las características del chorro de combustible líquido, las imágenes de longitud líquida serán procesadas con un algoritmo desarrollado en MATLAB[®], a través del cual se obtendrá información sobre la penetración, el ángulo, y el área del chorro.

2.3.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Esta última sección se centra en el análisis de resultados obtenidos, específicamente se analiza la influencia de las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiesel sobre la penetración, ángulo, y área del chorro.

CAPÍTULO 3

MARCO TEÓRICO SOBRE EL PROCESO DE INYECCIÓN DIÉSEL

En este capítulo se presenta el fundamento teórico que sostiene el presente estudio, primeramente se describe el sistema de inyección diésel common-rail, seguidamente se describe los tipos de inyectores y su funcionamiento. Después se describe de manera general al chorro diésel y los parámetros macroscópicos de éste último, finalmente se explican las características de las estrategias de inyección múltiple.

3.1 FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE INYECCIÓN EN UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

3.1.1 SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL

El sistema de inyección de combustible es un elemento central en los motores Diesel, debido a que es el responsable de la entrega de combustible al motor para su funcionamiento. El proceso de mezcla aire-combustible, el proceso de combustión, las emisiones contaminantes generadas, y las prestaciones del motor dependen en gran medida del funcionamiento correcto del sistema de inyección. Para ello, tiene que cumplir una serie de funciones básicas:

- Introducir el combustible en el interior de la cámara de combustión según una ley de tasa de inyección, que definirá el comportamiento de las diferentes fases del proceso de combustión en sincronismo con el movimiento del pistón.
- Atomizar el combustible para aumentar la superficie de contacto con el aire caliente tras la etapa de compresión y acelerar la evaporación.
- Mezclar el combustible con el aire disponible en la cámara de combustión.

El sistema de inyección depende en gran medida del tipo de motor Diesel: inyección directa o inyección indirecta, como se muestra en la Figura 3.1[36].

- En los motores de inyección directa la cámara de combustión esta labrada en la parte superior del pistón. El flujo de aire que ingresa a través del conducto de admisión tiene una velocidad cerca de 25 m/s, por lo que el nivel de turbulencia del aire es prácticamente despreciable. Debido a esto el campo convectivo del combustible es quien tiene la responsabilidad de realizar el proceso de mezcla, para ello el combustible debe ser inyectado en la cámara de combustión a

elevada presión que permita un mejor proceso de atomización del chorro de combustible.

- En los motores de inyección indirecta la cámara de combustión consta de dos partes unidas por un conducto: la precámara o cámara de turbulencia que es por donde pasa el aire para adquirir un movimiento turbulento creado por la forma geométrica de la misma durante la carrera de admisión del pistón, esto con la finalidad de favorecer el proceso de mezcla aire-combustible, está situada comúnmente en la culata del motor. Y la cámara de combustión, la cual esta labrada en la parte superior del pistón (igual que en los motores de inyección directa). En este tipo de motores la presión de inyección no tiene mucha influencia, y rondan en un rango entre 20-30 MPa. El aire es quien asume la responsabilidad principal del proceso de mezcla en este tipo de sistemas.

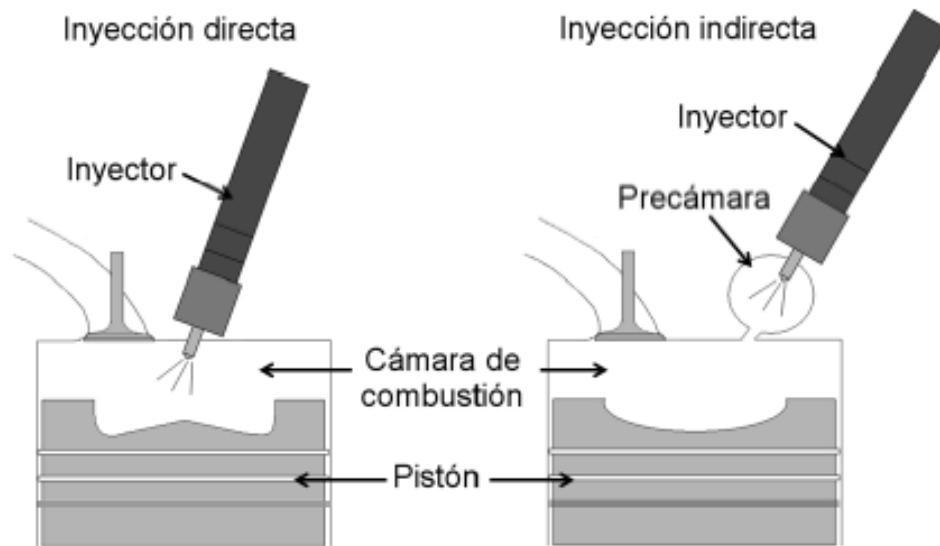


Figura 3.1: Sistemas de inyección directa e indirecta.

3.1.2 TIPOS DE SISTEMAS DE INYECCIÓN DIRECTA

Prácticamente se distinguen dos grupos: sistemas de acción directa y sistemas de acumulación. Los sistemas de acción directa son en donde la bomba de alta presión se encarga de dosificar el combustible que se inyecta a la cámara de combustión. El combustible es suministrado por la bomba de alta presión a través de las líneas de inyección y la presión depende del régimen de giro de la bomba. Algunas de las desventajas de este sistema son las siguientes:

- No se mantiene una presión constante durante el proceso de inyección debido al propio funcionamiento de la bomba, que a su vez depende del motor, ya que la presión es determinado por el régimen de giro de la bomba.
- El inicio de la inyección también se ve modificada por el funcionamiento del motor, obliga a equipar las bombas con elementos para poder calarlo respecto de una posición determinada del pistón.

Los sistemas de acumulación son los sistemas donde el inyector se encarga de la dosificación y atomización del combustible. La función de la bomba de alta presión es aumentar la presión, y una vez teniendo la presión deseada es mantenerla.

3.1.3 SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL COMMON-RAIL

Actualmente en la mayoría de los vehículos con motor Diesel de tipo turismo e industriales se emplea el sistema de inyección diésel common rail que se encuentra dentro de la categoría de sistemas de acumulación en los que la apertura del inyector esta gobernada electrónicamente. Algunas de las ventajas del sistema de inyección diésel common rail frente a los sistemas tradicionales son los siguientes:

- Control del punto de inicio y final de la inyección.
- Gran precisión de cantidad de combustible inyectado.
- Amortigua las oscilaciones de presión originadas por la bomba de alta presión o por la rápida descarga del combustible por los orificios de las toberas de los inyectores.
- Presión de inyección independiente del régimen del motor.
- Capacidad para trabajar a altas presiones de inyección. Xiangang Wang et al. [30], han realizado experimentos con hasta 300 MPa de presión de inyección.
- Presión constante a través del proceso de inyección.
- Posibilidad de descomponer la inyección en dos o más etapas (estrategias de inyección múltiple).

A continuación se presenta en la Figura 3.2 [37], un diagrama esquemático del sistema de inyección diésel common-rail, en donde sus componentes se pueden clasificar en tres grupos: los elementos que conforman el circuito de baja presión, los cuales son: el depósito de combustible, las tuberías, el filtro y la bomba de alimentación, los elementos que conforman el circuito de alta presión los cuales son: la bomba de alta presión, el common-rail, la válvula reguladora de presión, el sensor de presión, la línea de alta presión y los inyectores, y la ECU (*“Electronic Control Unit”*, por sus siglas en inglés).

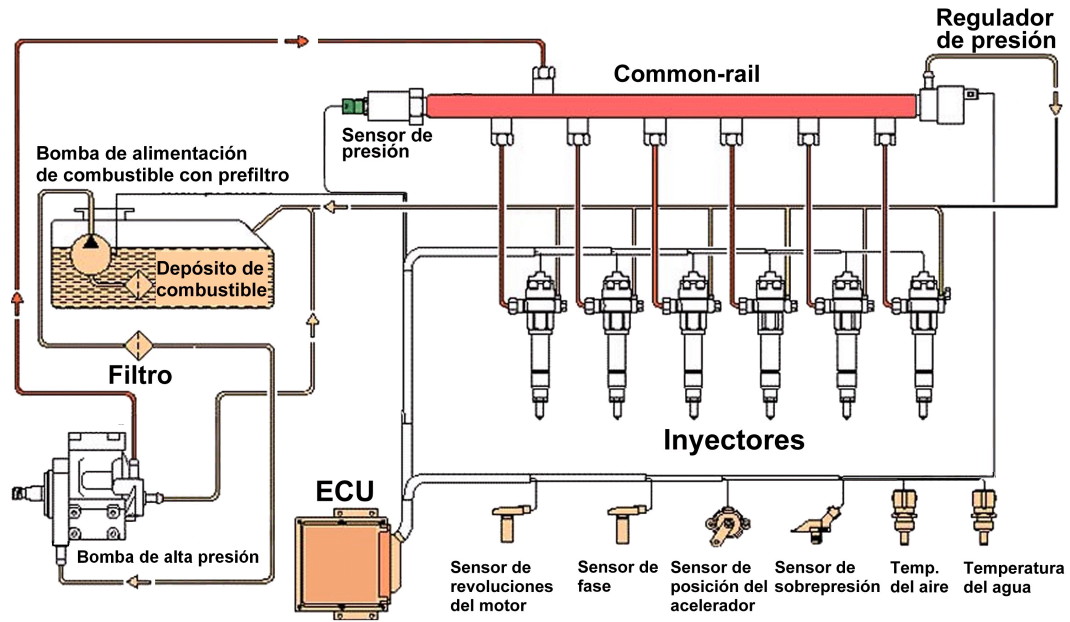


Figura 3.2: Sistema de inyección diésel common-rail.

El combustible que se encuentra en el depósito es succionado por la bomba de alimentación con el fin de llevarlo a la bomba de alta presión, durante este trayecto el combustible pasa por un filtro que permite eliminar impurezas o posibles restos de agua que pueden dañar los demás componentes del sistema, especialmente causando corrosión en la bomba de alta presión u obstruir los orificios de los inyectores. La bomba de alta presión que es accionada con un motor entrega el combustible a un depósito común (common-rail) y de ahí a cada uno de los inyectores de los cilindros del motor. Parte del combustible entregado es inyectado a la cámara de combustión una vez que los inyectores se abren, y otra parte más pequeña permite el pilotaje hidráulico que controla la aguja del inyector, y luego es devuelta al depósito.

El volumen de combustible que se encuentra entre la bomba de alta presión y los inyectores específicamente en el depósito común (common-rail) sirve como acumulador, lo cual permite amortiguar las ondas de presión ocasionadas por el funcionamiento de la bomba de alta presión o por la rápida descarga del combustible por los orificios de las toberas de los inyectores como ya se había comentado an-

teriormente. Estas ondas de presión pueden llegar a ser del orden de Megapascuales (MPa) [38, 39].

Un sensor de presión mide la presión dentro del depósito común (common-rail) y la compara con el valor de consigna grabado en la ECU, si los valores de presión son diferentes, un orificio de descarga en el regulador de presión se abre o se cierra con la finalidad de igualar ambos valores. El combustible sobrante regresa al depósito por la línea de retorno.

La ECU controla la apertura y cierre de los inyectores por medio de pulsos eléctricos durante instantes de tiempo definidos. La duración de la inyección, la presión de combustible en el rail, y la capacidad de descarga de los orificios de la tobera determinan la cantidad de combustible inyectado.

3.1.4 INYECTORES DIÉSEL

El elemento más complejo e importante dentro del sistema de inyección diésel common-rail es el inyector, pues el proceso de mezcla aire-combustible y posteriormente el proceso de combustión dependen en gran medida de éste. Los inyectores diésel puede ser de dos tipos: accionados por válvula solenoide (el cual ha sido utilizado para la realización de los experimentos del presente estudio) o piezoeléctricos (los cuáles son considerados de última generación, ya que permiten una respuesta más rápida que los anteriores).

3.1.4.1 INYECTOR DIÉSEL TIPO SOLENOIDE

En la Figura 3.3 [36, 37], se muestran los elementos principales que componen a un inyector diésel de tipo solenoide son: la válvula electromagnética, el portainyector (en el que se incluye el racor de alta presión, el filtro, el cuerpo, el muelle y la varilla) y la tobera. Así como también algunas de las variables más importantes que

definen el correcto funcionamiento del inyector son: el levantamiento de la aguja y la válvula solenoide, presión de inyección, presión en el volumen de control y la tasa de inyección. En la figura se muestra la evolución de éstas para la estrategia de inyección piloto.

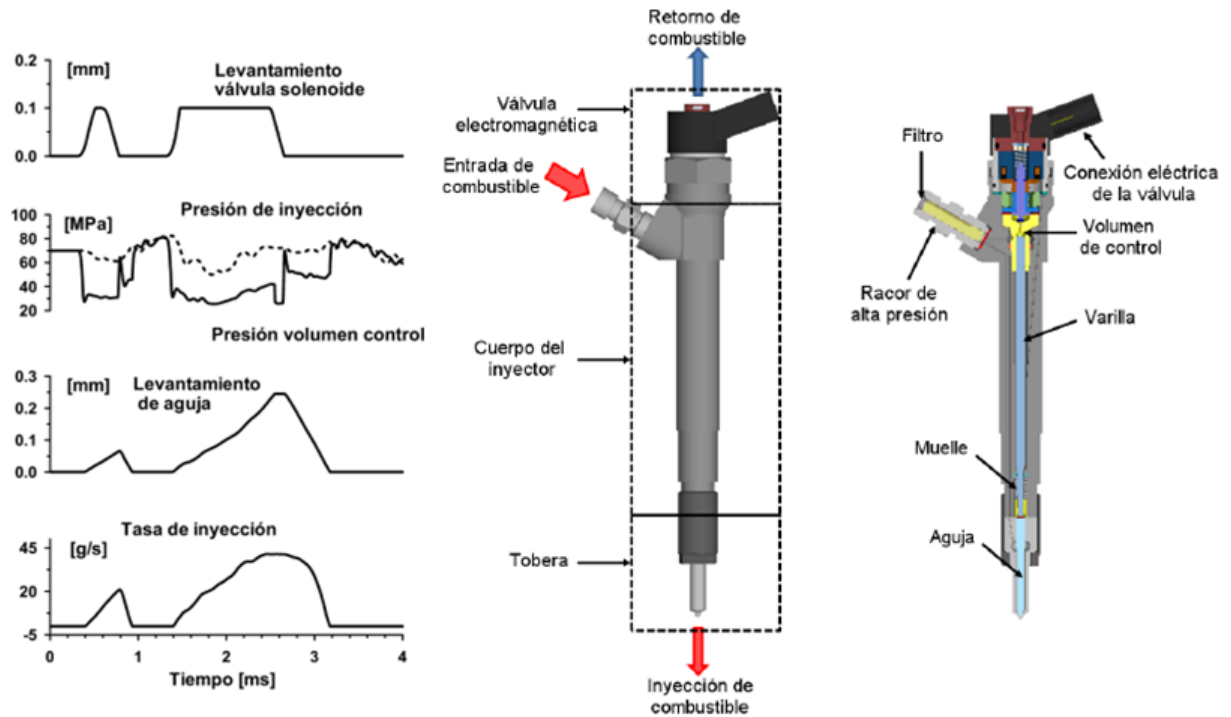


Figura 3.3: Elementos de un inyector diésel tipo solenoide y variables de funcionamiento para una estrategia de inyección piloto.

La Figura 3.4 [36], facilita la explicación del principio de funcionamiento de un inyector diésel tipo solenoide, el cual se detalla a continuación. El combustible que se encuentra en el common-rail pasa a los inyectores donde se separa a través de dos conductos. Uno de ellos llega hasta la parte inferior del inyector que es donde se suministra de combustible a la tobera, el otro es utilizado para suministrar al volumen de control que se encuentra en la parte alta de la varilla, mediante el orificio E.

Cuando el solenoide está desactivado, el orificio S se encuentra cerrado. Por consiguiente, la presión del combustible, que equivale a la presión que se tiene en el rail, actúa tanto sobre la parte superior de la varilla (mediante el orificio E) como en la parte inferior de la aguja. Como consecuencia del mayor área de la varilla y de la fuerza ejercida por el muelle, la aguja se mantiene en su asiento, cerrando los orificios de descarga. Sin embargo cuando la válvula solenoide es activada, el orificio S se abre disminuyendo la presión que se tiene en el interior del volumen de control. Por tanto, la presión que se tiene en la parte superior de la varilla es menor respecto a la que se tiene en la parte inferior de la aguja. Esto provoca el levantamiento del conjunto varilla-aguja, abriéndose los orificios e iniciando por consiguiente el proceso de inyección.

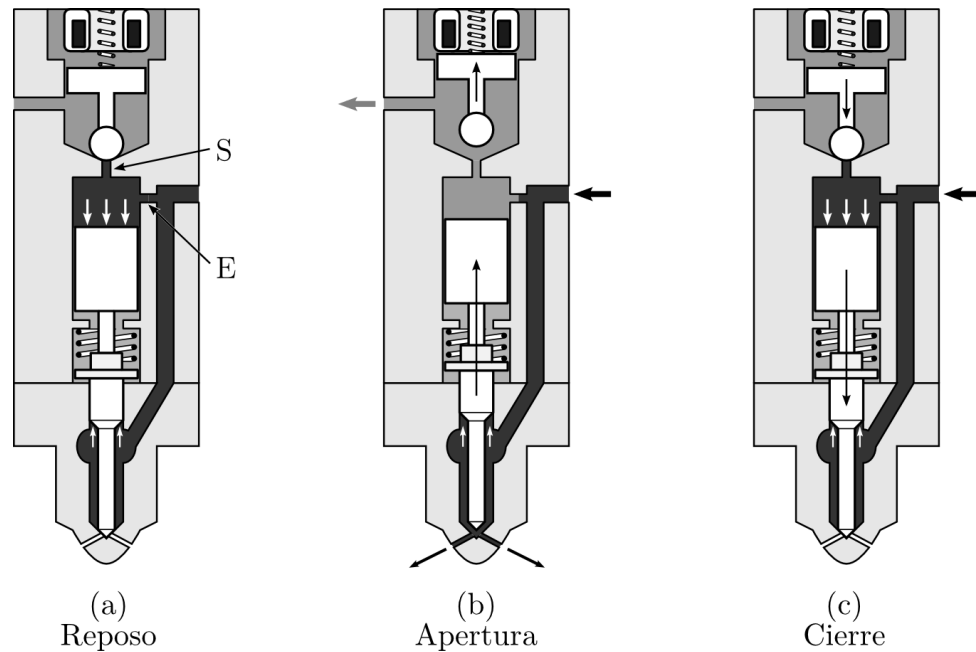


Figura 3.4: Principio de funcionamiento de un inyector diésel tipo solenoide.

3.1.4.2 INYECTOR DIÉSEL TIPO PIEZOELÉCTRICO

La Figura 3.5 [36], muestra los elementos principales de un inyector piezoeléctrico en donde la principal diferencia es la sustitución de los elementos móviles

y la varilla por un material piezoeléctrico que se comprime o expande en función de la corriente de energización que se le aplica. El funcionamiento es similar al inyector tipo solenoide con la diferencia de que es un material piezoeléctrico y no una válvula solenoide el que bloquea o desbloquea, un orificio que permite el paso de combustible desde el volumen de control hacia el retorno.

Este tipo de inyectores son considerados de última generación ya que poseen grandes ventajas frente a los convencionales de tipo solenoide. Dentro de sus principales ventajas se encuentran:

- Gran precisión, ya que el empleo de material piezoeléctrico permite obtener desplazamientos de la aguja por debajo de subnanómetros.
- Respuesta más rápida en el levantamiento y cierre de la aguja del inyector.
- Generación de grandes fuerzas.
- Menor desgaste.

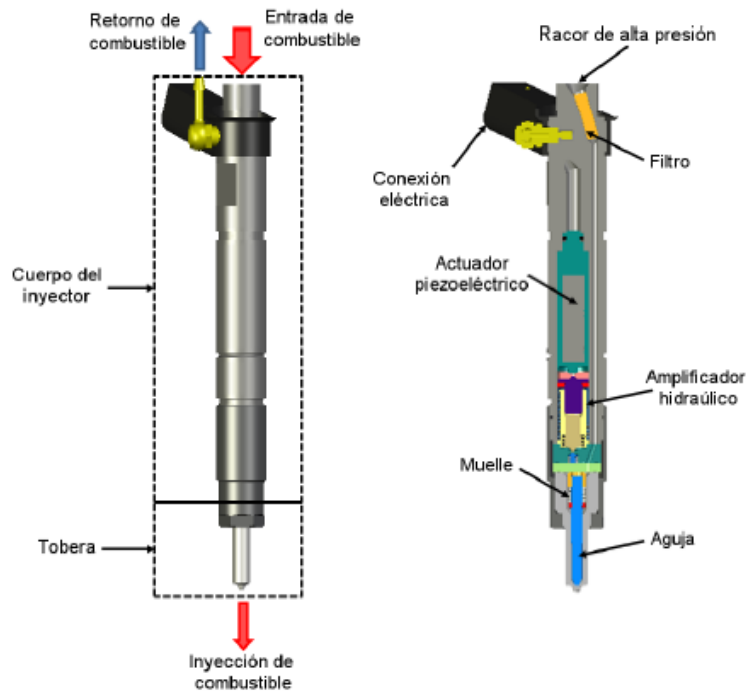


Figura 3.5: Elementos de un inyector diésel tipo piezoeléctrico.

3.1.5 TOBERAS DE INYECCIÓN

La tobera es el elemento del inyector diésel a través del cual pasa el combustible hacia la cámara de combustión del motor, por lo tanto juega un papel muy importante dentro del proceso de mezcla aire-combustible y posteriormente en el proceso de combustión. Para favorecer estos procesos las toberas son diseñadas con varios orificios dependiendo del tamaño del motor (entre 5 a 10 orificios). En la Figura 3.6 [36], se muestran los dos tipos de toberas que más se utilizan en la actualidad: la de tipo saco y la VCO (*“Valve Covered Orifice”*, por sus siglas en inglés).

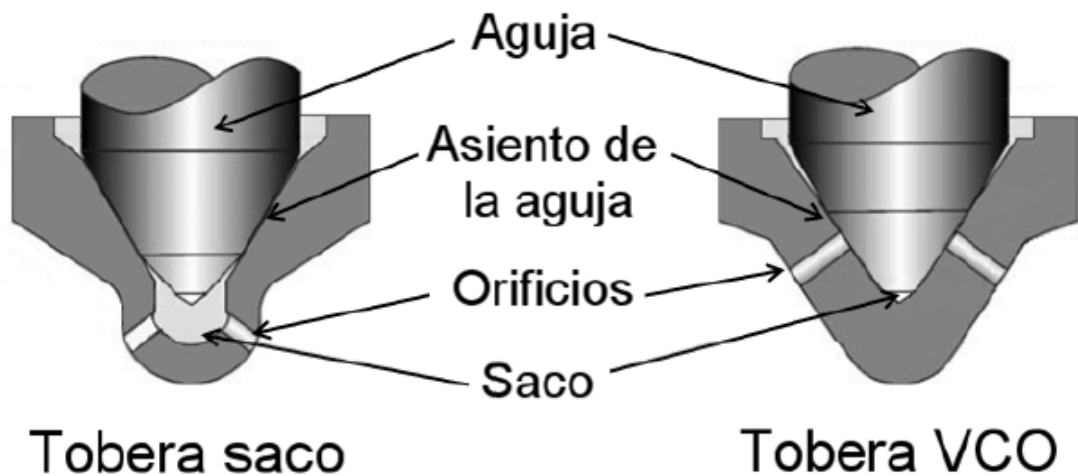


Figura 3.6: Toberas tipo saco y VCO.

En la Figura anterior se observa que en la tobera tipo VCO la aguja asienta sobre directamente sobre los orificios de la misma, bloqueando el paso de combustible. En la tobera tipo saco la aguja descansa aguas arriba de los orificios de descarga, impidiendo indirectamente el paso de combustible, dejando un volumen de combustible en el saco. Este volumen de combustible puede introducirse en la cámara de combustión a pesar de que la aguja cierre el inyector diésel, esto puede provocar combustiones incontroladas.

Las propiedades del flujo en el interior y a la salida de la tobera depende en gran medida de la geometría de los orificios de la misma, de ahí la importancia de definir los parámetros geométricos de estos. En la Figura 3.7 [40], se pueden observar las dimensiones más representativos de un orificio de una tobera de inyección los cuáles son: diámetro de entrada (d_i), diámetro de salida (d_o), longitud (L_o) y radio de entrada (r_i). Para obtener la conicidad del orificio se utiliza el parámetro *k-factor*, el cual se define como:

$$k\text{-factor} = \frac{(d_i - d_o) [\mu m]}{10} \quad (3.1)$$

Una desventaja importante de este parámetro es que no distingue los distintos tamaños de los orificios, por ejemplo, un orificio de diámetro de entrada (d_i) y diámetro de salida (d_o) de 220 y 200 μm , respectivamente, tiene el mismo valor de *k-factor*, que otra de 120 y 100 μm , respectivamente. sin embargo las variaciones de área y las características del flujo son completamente distintas para ambos casos.

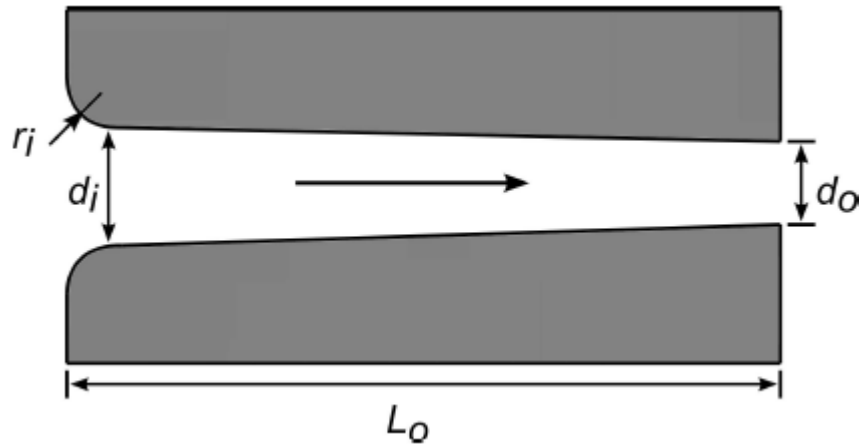


Figura 3.7: Parámetros geométricos del orificio de una tobera de inyección.

3.1.6 TASA DE INYECCIÓN

Un parámetro crucial en el desarrollo de los procesos de formación de mezcla y combustión en un motor Diesel es la entrega de combustible instantánea, denominado como tasa de inyección o ley de entrega de combustible. Esta ley se define como el flujo másico de combustible instantáneo a la salida de cada orificio de salida del inyector, es decir, la variación de la masa de combustible en función del tiempo.

El dispositivo que permite la medida del flujo másico de combustible se denomina tasímetro o caudalímetro, el cual tiene como principio de funcionamiento el método Bosch de tubo anecoico o también denominado método de tubo largo, el cuál se describe a continuación.

3.1.6.1 MÉTODO BOSCH

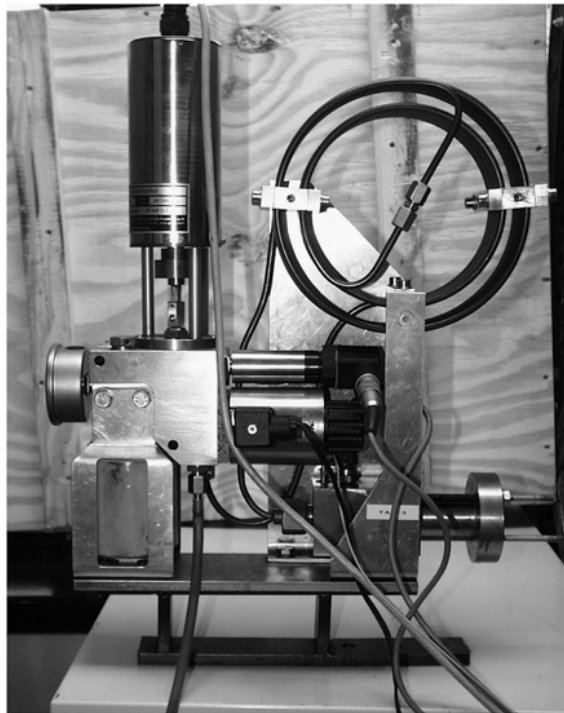


Figura 3.8: Tasímetro.

En la Figura 3.8 [13], se muestra la ilustración del principio de funcionamiento del tasímetro. El inyector se coloca en la cavidad prevista en el tasímetro de manera que cuando inicie la inyección, se llene de combustible el volumen total (tubo) del interior del tasímetro. Mediante una válvula se regula la presión del combustible a la presión de descarga o contrapresión deseada (que simula la presión existente en la cámara de combustión en un motor real).

Cuando comienza la inyección se genera una onda de presión que se desplaza a la velocidad del sonido a partir de la tobera del inyector, esta onda es medida por un captador piezoeléctrico colocado lo más cerca posible del inyector, con el fin de reducir el desfase entre el instante en que se produce la inyección y la medida de dicha variación de presión. La onda de presión generada viaja a lo largo del tubo de sección hasta el otro extremo del tubo, donde es amortiguada.

Cuando la onda de presión llega al depósito, el cambio de diámetro induce una onda secundaria reflejada en sentido contrario al de la onda principal, es decir en dirección hacia el inyector. Esta onda secundaria puede alterar la medida de la señal de presión, para evitar esto, se utiliza un tubo con una longitud suficientemente larga. La amplitud de la onda reflejada depende de la geometría del sistema y de las condiciones de inyección. La válvula de control permite modificar la configuración del extremo del tubo y así limitar los efectos de las ondas reflejadas [41].

La señal que registra este tipo de tasímetro es la onda de presión generada por la propia inyección, la cual se propaga aguas abajo. Por consecuencia, es posible obtener la señal de flujo másico instantáneo de la inyección a partir de la señal de presión secundaria. Por lo tanto, se plantea el estudio de la propagación de una onda dentro de una sección de tubo constante A_t . La onda de presión se propaga a la velocidad del sonido a e induce una variación de la velocidad, presión y de la densidad de la salida del fluido. Esta variación de presión ΔP , es medida por el captador.

Para el planteamiento teórico que rige el funcionamiento del tasímetro se considera un volumen de control conformado por un cilindro de sección A_t y longitud d que envuelve la onda de presión. La ecuación de conservación de cantidad de movimiento en la dirección del tubo aplicada sobre este volumen de control, queda como:

$$(p + \Delta p) \cdot A_t - p \cdot A_t = \rho_f \cdot A_t \cdot a \cdot \Delta u \quad (3.2)$$

donde a es la velocidad de sonido, ρ_f es la densidad del fluido y Δu es la variación de la velocidad del flujo en el tubo. Simplificando la ecuación se obtiene:

$$\Delta p = \rho_f \cdot a \cdot \Delta u \quad (3.3)$$

Por otro lado, la expresión de la variación de flujo másico (\dot{m}), al paso de la onda de presión se expresa de la siguiente manera:

$$\dot{m} = \rho_f \cdot a \cdot \Delta u \quad (3.4)$$

A partir de la ecuación 3.3 y 3.4 se obtiene la expresión de la variación de flujo másico en función de la variación de presión:

$$\dot{m} = \frac{A_t}{a} \cdot \Delta p \quad (3.5)$$

Una vez conociendo la sección de tubo del tasímetro y la velocidad del sonido en el fluido, con la ecuación 3.5 se determina el flujo másico instantáneo inyectado (tasa de inyección) [42]. Cabe destacar que la velocidad del sonido del fluido depende de su temperatura, la cual se puede conocer por medio de una correlación para poder determinar la tasa de inyección con mayor precisión.

3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL CHORRO DIÉSEL

La dinámica del chorro diésel viene influenciada por múltiples factores como son: las características del flujo de combustible en el interior del inyector (principalmente en el orificio de la tobera), la interacción entre las gotas de combustible (atomización y coalescencia), la interacción del chorro con el aire (evaporación y mezcla). Estos procesos no son independientes y la interacción entre ellos determina el comportamiento global del chorro Diesel [43].

3.2.1 ATOMIZACIÓN Y COALESCENCIA

Una vez que el combustible abandona la tobera del inyector y penetra en la cámara de combustión el primer fenómeno que tiene lugar es la atomización de la vena líquida [44]. Este proceso consiste en el rompimiento de la vena líquida en gotas y ligamentos del menor tamaño posible, de esta forma, cuanto menor sea el diámetro de las gotas, mayor será la relación superficie-masa del combustible en contacto con el aire caliente, y por lo tanto, existirá una mayor tasa de evaporación y una mayor eficiencia en la combustión.

La distancia a la que ocurre la atomización se denomina *longitud de la vena líquida* o *longitud intacta* y al pasar un tiempo es llamado *tiempo de ruptura*. Una vez que el chorro líquido se ha disgregado en gotas puede ocurrir que esas mismas gotas choquen entre sí formando gotas de mayor tamaño, a este proceso se le denomina *coalescencia*. El proceso de atomización del chorro ha sido estudiado ampliamente para distintas aplicaciones [45, 46].

3.2.1.1 REGÍMENES DE ATOMIZACIÓN

De acuerdo con Lefebvre [44] y con Reitz y Bracco [47] existen varios tipos de regímenes de atomización dependiendo de la velocidad del chorro de combustible, más exactamente del número de Reynolds [48], se muestra el esquema de cada uno de ellos en la Figura 3.9 y se describen a continuación:

- Régimen de Rayleigh, para muy bajas velocidades de inyección.
- Primer régimen inducido por interacción aerodinámica.
- Segundo régimen inducido por interacción aerodinámica.
- Régimen de atomización, para altas velocidades de inyección.

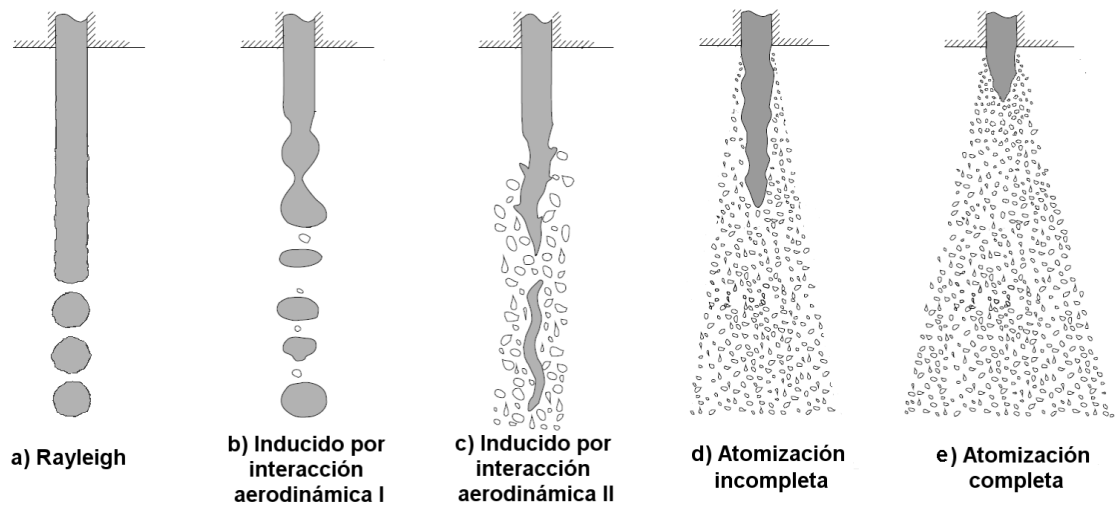


Figura 3.9: Regímenes de atomización.

Régimen de Rayleigh.

Este régimen es para bajas velocidades de inyección, del orden de 10 m/s, la atomización de la vena líquida se debe básicamente a la tensión superficial. Se crean deformaciones radiales axisimétricas por la interacción entre las perturbaciones iniciales en la superficie del chorro y las fuerzas de tensión superficial. Estas

deformaciones aumentan hasta provocar la ruptura de la vena líquida en gotas de diámetro uniforme, como se puede observar en la Figura 3.9 a).

Primer régimen inducido por interacción aerodinámica.

Para velocidades de inyección más elevadas, el efecto de las fuerzas aerodinámicas aumenta debido a la velocidad relativa entre la vena líquida y el gas ambiente. Se puede presentar de dos modos diferentes:

- Para velocidades más bajas la interacción aerodinámica amplifica las inestabilidades axisimétricas debido a las fuerzas de tensión superficial. Este fenómeno produce un chorro con “bulbos” importantes y se traduce en una atomización más rápida, con generación de gotas con un diámetro de la misma magnitud que el de la vena líquida.
- Para velocidades más altas, las fuerzas aerodinámicas cobran importancia frente a la tensión superficial. El chorro conserva una sección relativamente uniforme, oscila alrededor de su eje de simetría inicial, adquiriendo una forma helicoidal alargada y la sección de la vena líquida disminuye.

Segundo régimen inducido por interacción aerodinámica.

Las fuerzas aerodinámicas comienzan a ser predominantes, debido al aumento de la velocidad de inyección. La superficie de la vena líquida empieza a llenarse de pequeñas oscilaciones, producidas tanto por la turbulencia que se genera a la salida del inyector, como por la interacción aerodinámica. La velocidad de inyección influye en la distancia que se produce entre el orificio de salida y el comienzo de la separación de gotas. Estas gotas tienen un diámetro del orden de la longitud de onda de las perturbaciones.

Régimen de atomización.

En este régimen de atomización, la separación de las gotas ocurre cada vez más cerca del orificio a medida que aumenta la velocidad de inyección. A partir de

una cierta velocidad, la atomización empieza justo en la salida del orificio. Se observa entonces un cambio en el comportamiento global del chorro que marca el inicio del régimen de atomización. No existe una clara discontinuidad respecto al régimen anterior pero debido a que las velocidades son más elevadas, otros mecanismos (turbulencia, cavitación, etc.) empiezan a aparecer. El papel exacto de estos mecanismos no es bien conocido y puede ser muy variable en función de las condiciones de operación. El aspecto del chorro mostrado en la Figura 3.9 (d y e) sería representativo del comportamiento real observado bajo estas condiciones.

3.2.1.2 MECANISMOS DE ATOMIZACIÓN DE UN CHORRO DIÉSEL

Los fenómenos asociados al proceso de atomización de la vena líquida aún son desconocidos. Se cree que es consecuencia de la superposición de diversos mecanismos independientes que pueden cobrar más o menos importancia en función de las condiciones de inyección. Dichos mecanismos se presentan a continuación.

Ruptura debido a la inestabilidad aerodinámicas.

Es probable que el crecimiento de las perturbaciones inestables en la superficie del chorro se incremente por la mayor velocidad relativa entre el líquido y el gas ambiente. En ese caso, el mecanismo que controla el segundo régimen inducido por interacción aerodinámica se reproduce: las inestabilidades de las ondas de alta frecuencia presentes en la superficie de la vena, causadas por variaciones locales de presión en el gas y el líquido, forman finos ligamentos. El diámetro de la vena líquida va disminuyendo a medida que se aleja del inyector debido a esta pérdida de líquido. Los ligamentos se rompen por la acción de las fuerzas de tensión superficial y/o de la interacción aerodinámica con el gas ambiente. Este mecanismo ha sido estudiado teóricamente por varios autores: Reitz y Bracco [48], Ruiz [49], basándose principalmente en el análisis lineal de Taylor. Para velocidades de inyección relativamente bajas, cerca del segundo régimen inducido por interacción aerodinámica, este análi-

sis lineal concuerda bien con los resultados experimentales. Sin embargo, a medida que va aumentando la velocidad de inyección, la tasa de atomización y el ángulo de apertura del chorro calculados son menores, poniendo de manifiesto que existen entonces otros efectos importantes que favorecen el proceso de atomización. Además, la teoría aerodinámica no considera la influencia de la geometría del orificio que tiene un efecto muy importante en el caso de la inyección diésel. En consecuencia, no es posible explicar el fenómeno de atomización de un chorro diésel únicamente por el análisis lineal de las inestabilidades en la superficie de la vena líquida.

Turbulencia.

Autores como Ruiz [50], han descrito la turbulencia como una de las principales causas del proceso de atomización. La turbulencia se genera específicamente en el orificio del inyector. Las velocidades turbulentas radiales están contenidas por las paredes del inyector. A la salida del inyector, la componente radial de las fluctuaciones turbulentas expulsa combustible fuera de la vena líquida, provocando la atomización. Este mecanismo permite explicar la atomización de chorros inyectados en el vacío y para los cuales no existe interacción aerodinámica con el ambiente. De otro lado, es evidente que no es el único mecanismo de la atomización de un chorro diésel ya que es ajeno a las grandes variaciones de comportamiento del chorro en función de la densidad del gas.

Cavitación.

Otra de las causas importantes de la atomización está ligada a la cavitación, su influencia en el proceso puede ser de dos tipos. Por una parte, incrementa la turbulencia que, tal como se ha apuntado anteriormente, incrementa la atomización. Por otra parte, las burbujas de vapor presentes en el combustible hacen que ya en la salida del orificio se encuentre en flujo bifásico y además, inducirán discontinuidades en el líquido facilitando la división del chorro en ligamentos y gotas. Este fenómeno está fuertemente influenciado por las características geométricas del inyector así como de las condiciones de operación.

Relajación del perfil de velocidad.

La modificación del perfil de velocidades del fluido justo a la salida del orificio es otro mecanismo que provoca la atomización de la vena líquida. Desaparecen los esfuerzos viscosos debido a la presencia de la pared del orificio y se produce inestabilidad debido a que el combustible cerca de la superficie de la vena líquida se acelera, dando lugar a la atomización. Además de los mecanismos expuestos previamente, existe cierto acuerdo en que la relación entre la densidad del combustible y la del aire ambiente es otro parámetro que controla el proceso de atomización.

3.2.2 EVAPORACIÓN Y MEZCLA

Una vez que el chorro de combustible se ha disgregado en pequeñas gotas, éstas empiezan a avanzar dentro de la cámara de combustión, cobrando importancia los mecanismos de la mezcla del aire con el combustible. La interacción de las gotas de combustible con el aire dentro de la cámara de combustión determinan la formación de la mezcla aire-combustible e influyen directamente en el proceso de la combustión, y por consecuencia en las emisiones contaminantes del motor.

El flujo de aire en la cámara de combustión es turbulento y no estacionario, éste depende de las condiciones de operación y de la geometría del motor (i.e. pistón, cámara de combustión, válvulas de admisión y escape). Para caracterizar el flujo de aire es necesario determinar el perfil de velocidades para poder evaluar la existencia de vórtices en el flujo y poder medir el nivel de turbulencia.

En condiciones reales de un motor, el aire presente en la cámara de combustión se encuentra a alta temperatura (entre 900 y 1000 K), por lo cual se realiza un intercambio de energía con las gotas de combustible. Este intercambio de energía provoca un aumento de la temperatura en las gotas, el cual las va disminuyendo de tamaño hasta que desaparecen. Es así como aumenta la cantidad de combustible que cambia de fase líquida a gas.

En los primeros instantes de la inyección la fase líquida llega hasta el frente del chorro, a partir de una cierta distancia denominada *longitud líquida máxima*, dicha fase no supera este límite, aunque el chorro de combustible sigue penetrando pero ya en fase de vapor. La *longitud líquida máxima* se alcanza cuando la masa de aire englobada sea suficiente para evaporar todo el combustible. Los procesos de evaporación y mezcla han sido estudiados por diferentes autores, entre otros se puede destacar a Pastor [51] y Siebers [52].

3.3 PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO DIÉSEL LÍQUIDO

La caracterización del chorro diésel normalmente se realiza de dos puntos de vista: el macroscópico (características geométricas básicas del chorro), en el cual se centrará este estudio y el microscópico (características internas del chorro). En la Figura 3.10, se muestra desde el punto de vista macroscópico el comportamiento del chorro y los parámetros que lo definen como la penetración, el ángulo, y el área, los cuales se describen con detalle a continuación.

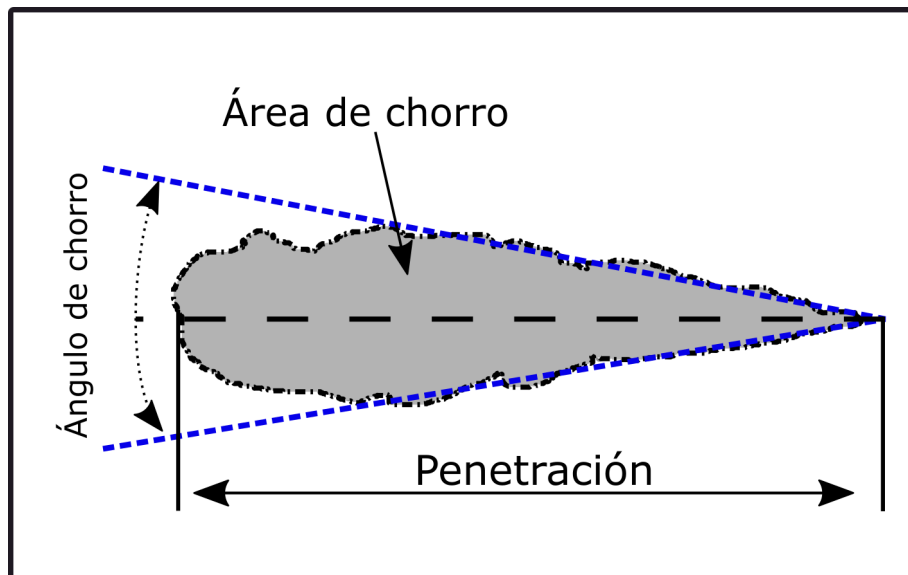


Figura 3.10: Morfología externa de un chorro diésel.

Penetración del chorro diésel

Se define como la distancia que recorre el chorro diésel en el seno del gas, y es un parámetro de suma importancia en el estudio del chorro diésel, ya que determina en gran medida tanto el proceso de mezcla aire-combustible, como el momento del choque del chorro contra la pared interior del pistón. La penetración depende fundamentalmente del flujo de cantidad de movimiento del chorro a la salida del orificio del inyector y de su ángulo de apertura, tal como lo confirman los numerosos trabajos dedicados a su estudio. Hay y Jones [53] realizaron una búsqueda bibliográfica de la mayoría de correlaciones que han sido publicadas a lo largo de los años para la penetración del chorro. En este trabajo todas las correlaciones propuestas comparten la misma estructura, en la cual la penetración queda relacionada con la diferencia entre la presión de inyección y la presión de descarga, las características de la tobera, la relación de densidades entre el gas ambiente y el combustible, el ángulo del chorro y el tiempo.

Una de las mejores correlaciones presentadas fue la propuesta por Wakuri et al. [54] que relaciona las variables descritas con anterioridad, la cual se define de la siguiente manera:

$$S(t) = \frac{(2 \cdot C_d^3)^{1/4}}{(\tan(\theta/2))^{1/2}} \cdot \left(\frac{\Delta P}{\rho_g} \right)^{1/4} \cdot \phi_o^{1/2} \cdot t^{1/2} \quad (3.6)$$

donde C_d es el coeficiente de descarga, θ es el ángulo de apertura del chorro, ΔP es la diferencia de presión entre la presión de inyección y la presión de descarga o ambiente, ρ_g es la densidad del gas, ϕ_o es el diámetro de la tobera y t es el tiempo transcurrido desde la inyección. Se puede ver que cuanto mayor es el ángulo del chorro, menor es la penetración del mismo. Esto indica la relación estrecha que existe entre la penetración y el ángulo de apertura del chorro.

La correlación propuesta por Dent [55], para determinar la penetración del chorro y en la que también están relacionadas todas las variables antes descritas, se muestra a continuación:

$$S(t) = 3.07 \cdot \left(\frac{\Delta P}{\rho_g} \right)^{1/4} \cdot (t \cdot \phi_o)^{1/2} \cdot \left(\frac{294}{T_g} \right)^{1/4} \quad (3.7)$$

donde ΔP es la diferencia de presión entre la presión de inyección y la presión de descarga o ambiente, ρ_g es la densidad del gas, t es el tiempo transcurrido desde la inyección, ϕ_o es el diámetro de la tobera y T_g es la temperatura del gas.

Ángulo del chorro diésel

El ángulo del chorro diésel es un parámetro característico importante desde el punto de vista de la mezcla aire-combustible y se suele definir como el ángulo que forman dos rectas que se ajustan al contorno del chorro, y que se cruzan en el orificio del inyector. Como la penetración, depende de la geometría del inyector y de las condiciones de inyección, así como de las propiedades del combustible y de las condiciones ambientales donde se inyecta. En el proceso de atomización, el chorro diésel se abre a la salida del orificio, y tras un pequeño transitorio, el ángulo se mantiene constante a lo largo del tiempo.

Uno de los primeros trabajos donde se estudió el ángulo del chorro diésel corresponde a Ranz [56], en el cual llegó a la siguiente expresión:

$$\tan(\theta/2) = \frac{4 \cdot \pi}{A} \cdot \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_a}} \cdot F_t \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_f} \cdot \frac{\sigma^2}{\mu_f^2 \cdot u_{eff}^2} \right) \quad (3.8)$$

donde σ es la tensión superficial del combustible, μ_f es la viscosidad dinámica del combustible, u_{eff} es la velocidad efectiva de inyección, A es una constante que debe ser ajustada dependiendo de la geometría del orificio y F_t es una función obtenida de manera analítica por Taylor, cuyo valor límite es de 0.288 en condiciones reales de inyección.

Hiroyasu y Arai [57], propusieron una correlación para el ángulo del chorro en toberas tipo saco y de geometría cilíndrica a partir de medidas experimentales, la cual se define de la siguiente forma:

$$\theta = 83.5 \cdot \left(\frac{L_o}{d_o}\right)^{-0.022} \cdot \left(\frac{d_o}{d_s}\right)^{0.15} \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_f}\right)^{0.26} \quad (3.9)$$

donde L_o es la longitud del orificio y d_s es el diámetro del saco de la tobera.

Área del chorro diésel

El área del chorro diésel es un parámetro que pocos autores estudian, y el cual tiene una gran relevancia, debido a que este representa la superficie de contacto que abarca el combustible al ser inyectado, de la cual depende la calidad de la mezcla aire-combustible; el área del chorro diésel se define después de haber determinado el contorno de pulverización y depende principalmente de las condiciones de operación a las que se inyecta el combustible. Delacourt et. al [58], realizaron uno de los primeros trabajos en los que se estudió el área del chorro diésel mediante el análisis de imágenes, y los compararon con el modelo presentado en la Ecuación 3.10, con la cual se obtiene un resultado muy cercano al medido experimentalmente.

$$A = 4.351d^2 \left[\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_g}} \frac{(t - t_0)}{d} \right] \theta \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{(4 + \pi\theta)}{(2 + \theta)^2} \quad (3.10)$$

donde d es el diámetro de la tobera, ΔP es la diferencia de presión entre la entrada y salida de la tobera, ρ_g es la densidad del gas, θ es el ángulo del chorro de combustible, y α es el ángulo de cono del chorro de combustible.

3.4 PRINCIPALES PROPIEDADES FÍSICAS QUE INFLUYEN EN LAS CARACTERÍSTICAS DEL CHORRO DIÉSEL LÍQUIDO

El comportamiento del chorro líquido de combustible se ve influenciado por sus propiedades físicas, entre otros factores, los cuales se mencionaron en la Sección 3.2. Las principales propiedades físicas del combustible que influyen en el comportamiento del chorro líquido son: la densidad, viscosidad, y tensión superficial.

Densidad

La densidad se define como la masa por unidad de volumen de un fluido, depende ligeramente de la presión y en mayor medida de la temperatura, es una propiedad de fácil medición y se puede correlacionar con otras propiedades fundamentales para evaluar el desempeño de los motores de combustión interna.

En la actualidad, los sistemas de inyección diésel common-rail trabajan con presiones de inyección del orden de 1700 bar, lo que provoca un aumento en la temperatura del combustible de hasta 100 °C. Este incremento de la temperatura disminuye la densidad del combustible, la cual influye en los parámetros macroscópicos del chorro diésel líquido.

Un combustible con alta densidad afecta de manera negativa el proceso de mezcla aire-combustible, debido a que se inyecta mayor cantidad de masa de combustible, lo que ocasiona que el chorro líquido genere una mayor presión sobre el aire dentro de la cámara de combustión y avance por más tiempo a través del propio gas, lo que genera altos valores de penetración del chorro líquido.

Viscosidad

La viscosidad de un fluido es la resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes que provocan una resistencia a su movimiento, en términos generales la viscosidad es la resistencia de un líquido a fluir.

En los motores Diesel, la viscosidad del combustible es un parámetro importante, debido a que su valor debe ser lo suficientemente bajo para poder circular por los conductos del sistema de inyección diésel common-rail, y a la vez cumplir con la lubricidad requerida.

La viscosidad determina el tamaño de gota que se genera del proceso de atomización del chorro de combustible líquido, un alto valor de viscosidad en el combustible afecta de manera negativa el proceso de mezcla aire-combustible, debido a que desfavorece el proceso de atomización, como consecuencia de esto, las gotas pueden llegar a ser de gran tamaño y penetrar hasta las paredes de la cámara de combustión, provocando la aparición de depósitos carbonosos, los cuales generan humos negros en el colector de escape del motor.

Tensión superficial

La tensión superficial de un líquido es la cantidad de energía necesaria para aumentar su superficie por unidad de área. En el sistema de inyección diésel common-rail, la tensión superficial del combustible es una propiedad importante debido a que determina la dispersión del combustible en el aire dentro de la cámara de combustión.

Esta propiedad es la que mantiene la gota de combustible de forma esférica y contrarresta las fuerzas aerodinámicas ejercidas por la cámara de combustión que se encargan de atomizar el combustible para después mezclarse con el aire.

El combustible con alto valor de tensión superficial afecta de manera negativa el proceso de mezcla aire-combustible, debido a que genera un mayor tamaño de gota en la atomización del combustible, provocando una menor superficie de contacto entre el combustible y el aire, lo que genera una menor eficiencia del proceso de mezcla, provocando un aumento en la generación de las emisiones contaminantes.

3.5 ESTRATEGIAS DE INYECCIÓN MÚLTIPLE

La tarea principal de cualquier sistema de inyección diseñado para la automoción es proporcionar la cantidad de combustible correcta en el tiempo preciso para cada cilindro. Con el uso de estrategias de inyección múltiple, el proceso de inyección en cada ciclo de motor, el cual tradicionalmente consiste en un solo evento de inyección, se divide en dos o más partes. Existen diferentes tipologías dentro de las estrategias de inyección múltiple atendiendo a los diferentes parámetros que las definen: números de eventos de inyección, posición relativa entre los diferentes eventos de inyección y duración de los mismos, entre otros.

En la Figura 3.11 [59], se muestran las tres principales configuraciones de inyección múltiple y se detallan a continuación.

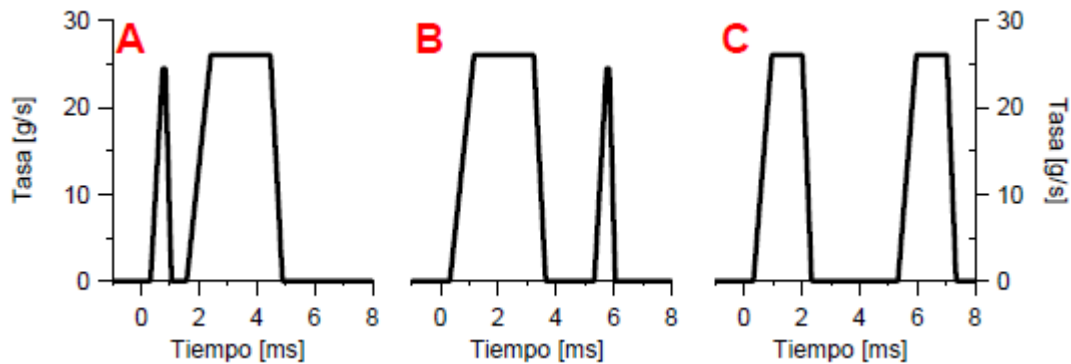


Figura 3.11: Estrategias de inyección múltiple. a) Estrategia de inyección piloto, b) estrategia de post-inyección, c) estrategia de inyección partida.

- *Estrategia de inyección piloto*: consiste en partir la inyección en dos eventos de inyección, en el primero de los cuales se introduce una pequeña masa en el interior del cilindro, y en el segundo evento de inyección se introduce la cantidad principal de combustible.
- *Estrategia de post-inyección*: al igual que en el caso anterior, consiste en partir la inyección en dos eventos de inyección. No obstante, en este caso el evento de inyección que introduce la masa de combustible pequeña se introduce después del evento principal en el que se introduce la mayor parte de la masa de combustible.
- *Estrategia de inyección partida*: es una estrategia de inyección en la que el total de la masa de combustible inyectada se parte en dos o más eventos que no pueden ser considerados como inyecciones piloto o post por el tamaño.

La nomenclatura usada para definir la secuencia de inyección múltiple se ilustra en la Figura 3.12 [59]. De forma simplificada una estrategia de inyección simple se puede definir únicamente conociendo el principio de la inyección y la duración de la misma. Por el contrario, con las estrategias de inyección múltiple el número de grados de libertad a la hora de definir la secuencia crece con el número de pulsos (eventos de inyección). Además, aparte del principio de la inyección (*Start of Injection, SoI*) y de la duración de cada pulso, se tiene que definir el tiempo entre cada dos pulsos consecutivos (*dwell time*), es decir, el tiempo entre el final de una inyección y el inicio de la consecutiva.

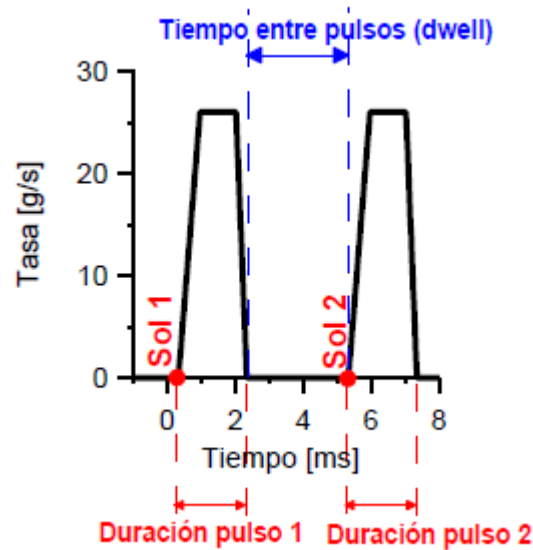


Figura 3.12: Esquema de los diferentes parámetros que entran en juego a la hora de definir una estrategia de inyección múltiple.

Cuando se realizan estrategias de inyección múltiple aparece un fenómeno adicional respecto a una inyección simple: la interacción entre pulsos. Este fenómeno sería más relevante cuanto más cerca estén entre sí los pulsos de inyección.

La interacción entre pulsos implica que las condiciones en cámara sobre las que se inyecta un pulso son diferentes a las correspondientes al pulso de inyección precedente. En una estrategia de inyección partida, la primera inyección no sólo crea movimiento en el gas ambiente en la dirección axial en la que es inyectada, sino que también genera turbulencia, con lo que las condiciones ambientales sobre las que se inyecta el chorro diésel de la segunda inyección son diferentes.

Si adicionalmente el ambiente fuese reactivo cabe destacar dos circunstancias: por un lado el nivel de oxígeno que se encuentra el chorro de la segunda inyección es menor, ya que parte del mismo ha sido englobado por el chorro de la primera inyección. Por otro lado, el nivel de temperatura sobre el que se inyecta el segundo pulso es mayor, debido a la combustión de la primera inyección.

CAPÍTULO 4

HERRAMIENTAS TEÓRICAS Y EXPERIMENTALES PARA EL ESTUDIO

En este capítulo se presentan las herramientas teóricas y experimentales con las que se llevó a cabo el presente estudio. Se describe la maqueta de visualización a volumen constante, en donde se detalla el sistema de inyección diésel common-rail, y la cámara de volumen constante. Seguidamente se describe la técnica óptica: Iluminación directa por dispersión MIE, después cómo se obtiene la relación pixel/mm para analizar las imágenes obtenidas del chorro líquido, y el código para el procesamiento de las imágenes. Finalmente, se describe la metodología para determinar las principales propiedades físicas que afectan el chorro líquido de combustible (i.e. densidad, viscosidad y tensión superficial).

4.1 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL: MAQUETA DE VISUALIZACIÓN A VOLUMEN CONSTANTE.

Para determinar los parámetros macroscópicos de las mezclas seleccionadas, se hace uso de la **maqueta de visualización a volumen constante** que se encuentra en el laboratorio de fenómenos de transporte, el cual forma parte de los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE), de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME), en la Universidad Autónoma de Nuevo León. Esta instalación experimental está constituida por una cámara a volumen constante, y un sistema de inyección diésel common-rail [60]. En la Figura 4.1, se muestra la maqueta de visualización a volumen constante.



Figura 4.1: Maqueta de visualización a volúmen constante.

4.1.1 CÁMARA DE VISUALIZACIÓN A VOLÚMEN CONSTANTE

La cámara de visualización a volumen constante se muestra en la Figura 4.2. Esta cámara permite reproducir las condiciones termodinámicas similares a las que se producen en la cámara de combustión de un motor de combustión interna de encendido por compresión (MEC). Ésta cuenta con 3 accesos ópticos, dos de los cuales se emplean para la iluminación del chorro líquido de combustible, y el tercero para la visualización del mismo.

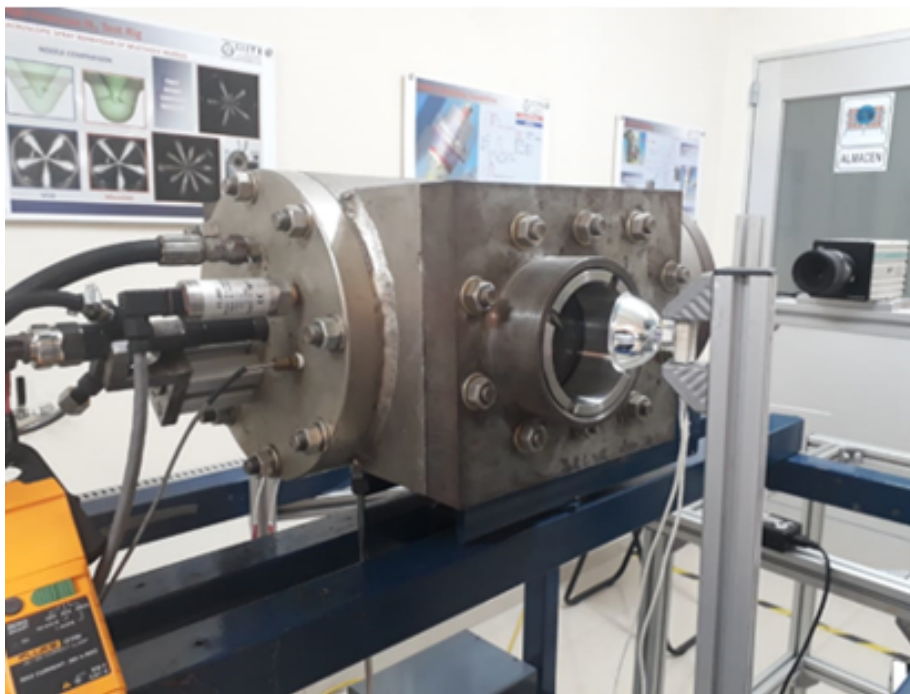


Figura 4.2: Cámara de visualización a volumen constante.

La cámara de visualización a volumen constante, está compuesta de una cámara cilíndrica de acero al carbón con un diámetro de 23.50 cm, un espesor de 6 cm y un largo de 40.32 cm, incluye dos placas laterales de 24.13 cm de largo, 20.32 cm de alto y 7.50 cm de ancho, además de una placa en la parte frontal y otra en la parte posterior, ambas de 23.50 cm de diámetro, con un espesor de 9.61 cm y 5.08 cm, respectivamente.

Las dos placas laterales y la placa frontal cuentan con un acceso óptico de 8 cm de diámetro, los tres accesos cuentan con ventanas de zafiro que soportan una presión máxima de 180 bar. La placa posterior cuenta con cuatro cavidades donde se ubican el inyector, la alimentación del nitrógeno, un sensor de temperatura, y un sensor de presión. Los sensores permiten monitorear las condiciones de operación en el interior de la cámara, las lecturas de los dos sensores son enviadas a un sistema de control y adquisición de datos NI CompactRIO, que después son tratados mediante un programa realizado en LabVIEW.

Para simular la contrapresión ejercida por el pistón cuando llega al punto muerto superior (PMS) en un motor Diesel, y mantener las condiciones inertes dentro de la cámara de visualización a volumen constante, ésta se presuriza con nitrógeno. Una vez realizados los experimentos se despresuriza la cámara mediante una válvula de alivio.

4.1.2 SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL COMMON-RAIL

Para la descarga de combustible se utiliza un sistema de alta presión que puede alcanzar hasta los 1300 bar de presión de inyección. En la Figura 4.3, se muestra un diagrama esquemático de la instalación experimental, con la finalidad de identificar los componentes que conforman a ésta, así como la función de cada uno de ellos. Cada uno de estos se enumeran en la Tabla 4.1.

La zona de baja presión está compuesta por un tanque de combustible de acero inoxidable con capacidad para 21 L (1), éste tiene una línea de ingreso hacia un purgador de aire (2), que cuenta con una válvula manual para expulsar el aire que puede estar presente en el interior del sistema de inyección, y así evitar daños en el mismo, una vez que sale el combustible del purgador pasa a un filtro de $5\ \mu\text{m}$ (3), el cual impide el paso de partículas sólidas que puedan estar suspendidas en el depósito de combustible. La bomba de baja presión (4), es la encargada de suministrar el

combustible desde el depósito hasta la bomba de alta presión. Con la finalidad de mantener estable la temperatura del combustible durante el evento de inyección se instalaron dos intercambiadores de calor de tubo y coraza (5), debido a que el aumento de temperatura cambia las propiedades físicas del combustible como la densidad, viscosidad y tensión superficial, en donde éstas afectan el comportamiento del chorro diésel líquido. Una vez que sale el combustible por los intercambiadores de calor pasa nuevamente por un filtro de $5\ \mu\text{m}$ (6) para asegurar que no contenga sedimentos o partículas sólidas que puedan dañar la bomba de alta presión.

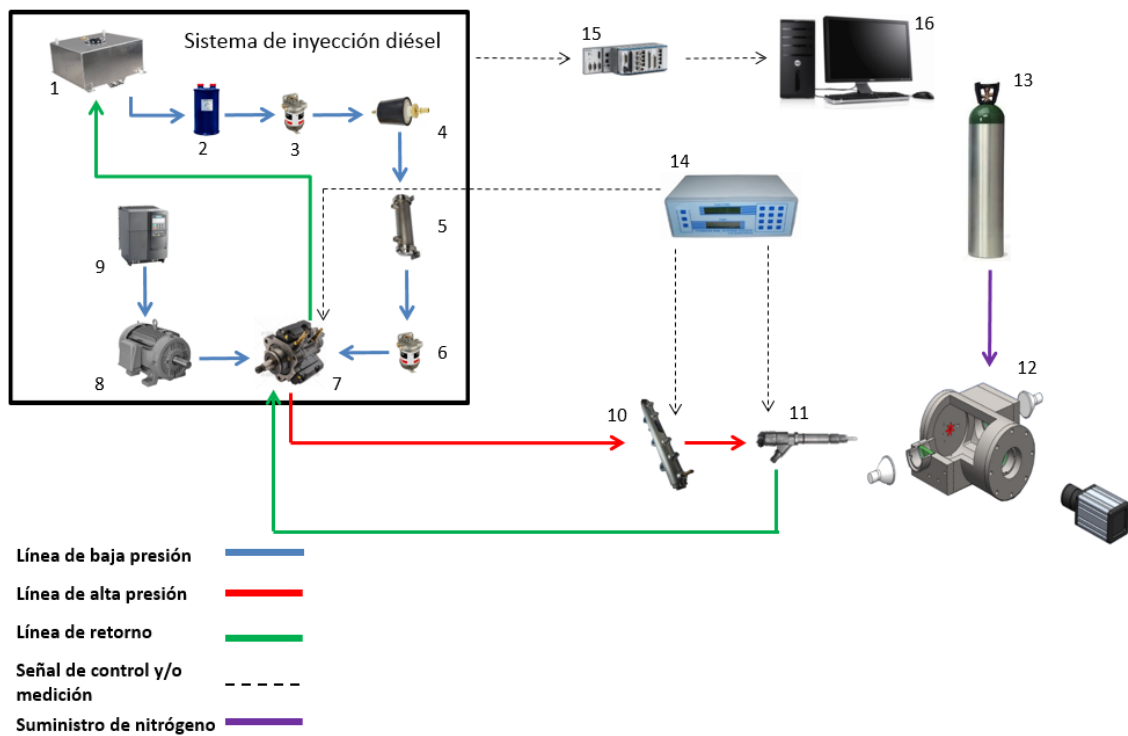


Figura 4.3: Esquema del sistema de inyección diésel common-rail.

Tabla 4.1: Componentes del sistema de inyección diésel common-rail.

1	Depósito de combustible	9	Variador de frecuencia
2	Purgador	10	Common-rail
3	Filtro de combustible	11	Inyector
4	Bomba de baja presión	12	Cámara de volumen constante
5	Intercambiador de calor	13	Nitrógeno
6	Filtro de combustible	14	Unidad de control electrónica
7	Bomba de alta presión	15	Sistema de adquisición de datos
8	Motor eléctrico	16	Computadora

La zona de alta presión empieza una vez que el combustible llega a la bomba de alta presión (7), ésta es la que se encarga de incrementar la presión a la que se desea inyectar el combustible, su funcionamiento es a base de 3 émbolos posicionados radialmente a 120° entre sí, además de contener un eje central del cual es accionada por un motor eléctrico (8) de corriente alterna. Para controlar el régimen de giro del motor se instaló un variador de frecuencia (9), éste es operado a 36 Hz para que el motor eléctrico entregue 1,059 rpm a la bomba de alta presión, los cuales están dentro de su rango de operación. El combustible que sale de la bomba de alta presión es transportado hasta el common-rail por medio de una manguera de 4 mm de diámetro interior, la presión máxima que soporta la manguera es de 2800 bar. La función del common-rail (10) es la de un acumulador de combustible y además, amortigua las ondas de presión generadas por la bomba de alta presión, y las generadas por la rápida descarga del combustible a través de los orificios de la tobera del inyector diésel. El combustible con elevada presión procedente del common-rail transita a través del inyector diésel de 7 orificios (11) hacia el interior de la cámara de volumen constante (12), la cual es presurizada con nitrógeno (13). La unidad de control electrónica (ECU) (14) *common-rail tester system*, permite controlar de forma manual los siguientes parámetros de operación:

- Presión del *common-rail* (P_{rail}). Presión generada por la bomba de alta presión y enviada hacia el *common-rail*.
- Pulso eléctrico (W). Tiempo que el inyector permanece abierto.
- Frecuencia de inyección (N). Número de inyecciones por minuto.

Las variables de presión y temperatura del sistema de inyección diésel common-rail son monitoreados mediante un sistema de adquisición de datos (15).

4.2 TÉCNICA ÓPTICA: ILUMINACIÓN DIRECTA POR DISPERSIÓN MIE

Con la finalidad de caracterizar el proceso de mezcla a través de los parámetros macroscópicos del chorro líquido de combustible, se emplea la técnica óptica de *iluminación directa por dispersión MIE*, la cual consiste en la obtención de imágenes del chorro líquido al ser éste iluminado de manera directa por un haz de luz, que se obtiene de una fuente continua de luz [58, 61]. En la Figura 4.4, se muestra el esquema del montaje experimental para la aplicación de la técnica óptica: iluminación directa por dispersión MIE, donde se puede observar el sistema de adquisición de imágenes, que está compuesto por una cámara de alta velocidad, un sistema de iluminación, y un sistema que sincroniza el disparo de la cámara con el pulso eléctrico del inyector diésel.

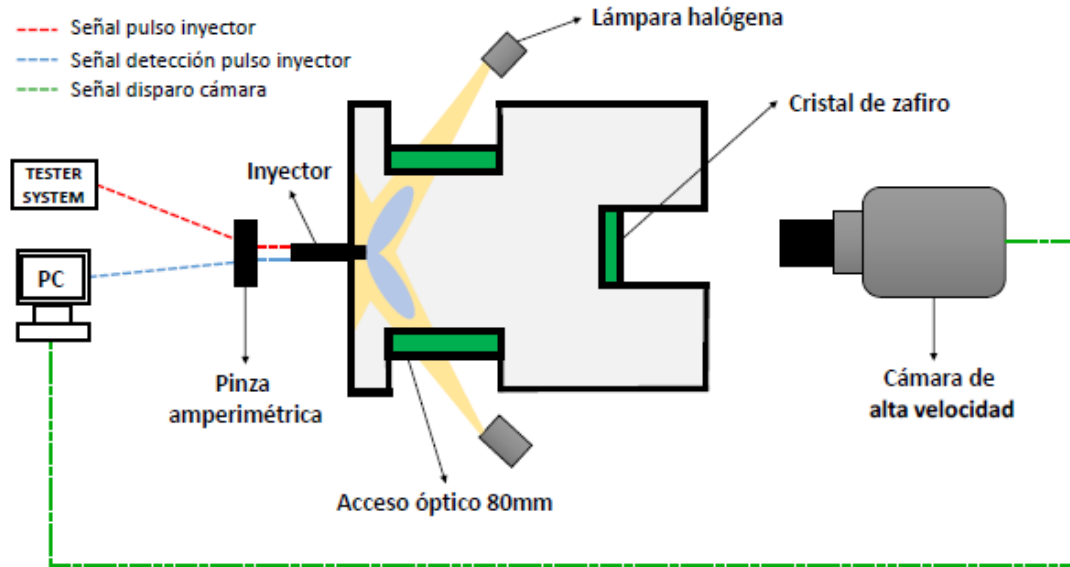


Figura 4.4: Técnica óptica: Iluminación directa por dispersión MIE.

La cámara es digital de alta velocidad, modelo Motion PRO X4 CMOS, con una capacidad de adquisición de 5130 imágenes/segundo para una resolución de 512 x 512 píxeles, tiene un sensor tipo CMOS con un rango dinámico de 8 bits, cuenta con un objetivo Nikon de 60 mm. La iluminación la comprenden 2 lámparas de halógeno con una potencia de 100 Watts y un voltaje de 12 Volts cada una.

La sincronización de la adquisición de imágenes se lleva a cabo mediante la detección de forma automática del pulso de corriente que le llega a la bobina del inyector diésel, que es medida mediante una pinza amperimétrica modelo i310s de la marca Fluke. La señal generada por la pinza es analizada por un sistema de control y adquisición de datos NI CompactRIO, que detecta automáticamente el flanco de subida y envía los pulsos de sincronización a la cámara de alta velocidad.

4.3 OBTENCIÓN DE LA RELACIÓN PÍXEL/MM

Uno de los parámetros fundamentales para llevar a cabo el procesamiento de las imágenes del chorro líquido de combustible, es la resolución espacial en píxel/mm. Esta relación, es necesaria para obtener medidas reales de los parámetros macroscópicos del chorro líquido de combustible, tales como el área, el ángulo y la penetración. El método para obtener la relación píxel/mm se detalla a continuación:

- Se coloca una hoja cuadrícula de medidas conocidas (7 x 7 mm cada cuadro), dentro de la cámara de volumen constante, centrada y debajo de la tobera del inyector diésel.
- Posteriormente, se toma una fotografía de la hoja cuadrícula, para obtener las coordenadas (X_1, Y_1) y (X_2, Y_2) de dos puntos de referencia que se encuentren en la misma línea horizontal de la hoja cuadrícula, como se muestra en la Figura 4.5.
- Por último, se corrobora que los dos puntos de referencia se encuentren a la misma altura, es decir que Y_1 y Y_2 sean iguales, de no ser así, se debe obtener la distancia en píxel entre los dos puntos utilizando el Teorema de Pitágoras. Una vez que se obtiene este valor, se mide la distancia real entre estos dos puntos de referencia en mm, para posteriormente dividir la distancia en píxel entre la distancia real en mm.

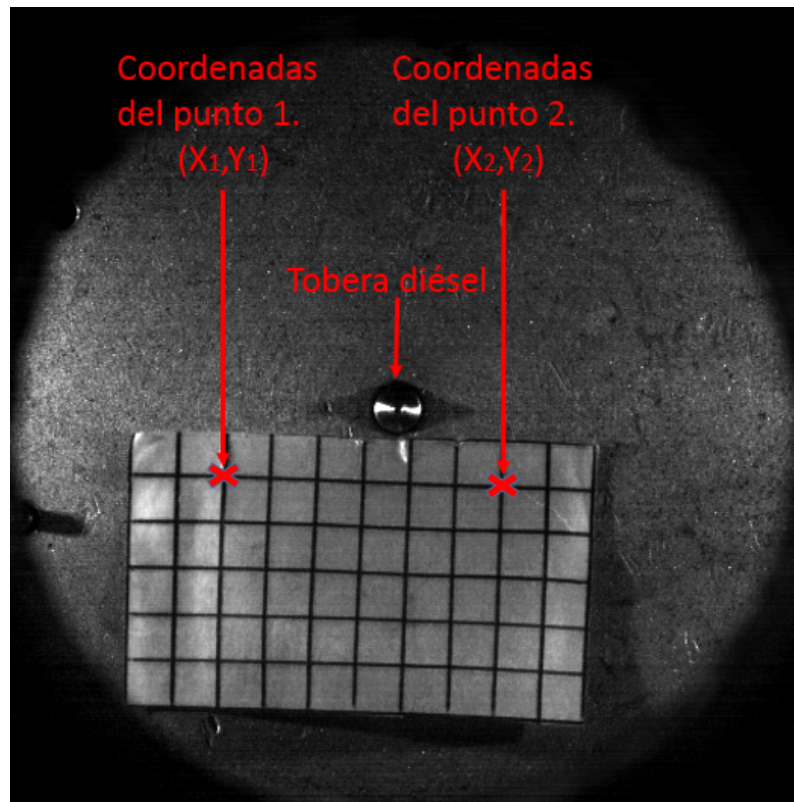


Figura 4.5: Imágen obtenida para determinar la relación píxel-mm.

Para el presente estudio, la relación píxel/mm que se determinó fue de 4.26, con una resolución de las imágenes adquiridas de 512 x 512 píxeles, y 197 μ s de tiempo de exposición.

4.4 CÓDIGO PARA EL PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES DEL CHORRO LÍQUIDO

Las imágenes del chorro líquido de combustible obtenidas durante los ensayos, son almacenadas en la estación de adquisición de video y analizadas en un código propio desarrollado en el software MATLAB[®] por Rubio Gómez et al. [62], el cuál delimita el contorno del chorro líquido de combustible, y determina los parámetros macroscópicos como la penetración, el área y el ángulo.

En la Figura 4.6, se puede observar la imagen de un chorro procesado por el código mencionado anteriormente, específicamente, el código delimita los contornos de los chorros, mediante una línea azul, y a partir de estos contornos detectados se determinan los parámetros macroscópicos del chorro líquido de combustible.

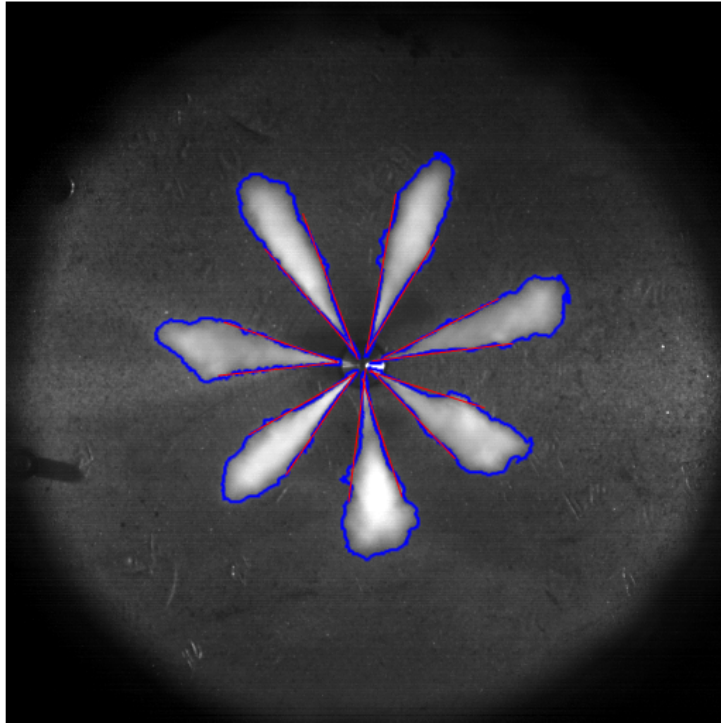


Figura 4.6: Imagen procesada del chorro líquido de combustible.

4.5 CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DE LOS COMBUSTIBLES OBJETO DE ESTUDIO

La caracterización fisicoquímica de los combustibles de trabajo es en base en las normas de calidad de combustibles líquidos. Las propiedades determinadas fueron: viscosidad a 40 °C, densidad a 15 °C, y tensión superficial a 25 °C. La importancia de la determinación de las propiedades antes mencionadas, es que tienen una influencia en el proceso de mezcla aire-combustible en el motor, y cada una de ellas afecta de manera diferente a este proceso, como se explicó en la Sección 3.4.

Para el caso de la viscosidad, densidad y tensión superficial, se determinaron a partir de correlaciones con datos de temperaturas de destilaciones de los combustibles. La destilación es una prueba fisicoquímica utilizada para medir la complejidad de las mezclas líquidas relacionadas con la volatilidad en los componentes de la muestra. Este ensayo se utiliza para verificar la idoneidad de las fracciones de combustible ligeras y pesadas para tener un buen rendimiento.

4.5.1 MÉTODO DE DESTILACIÓN DE ACUERDO A LA NORMA ASTM D86-04

La norma ASTM D86-04 [63], es un método de prueba que abarca la destilación atmosférica de productos derivados del petróleo, utilizando una unidad de destilación discontinua de laboratorio, para determinar cuantitativamente las características de intervalo de ebullición de productos tales como gasolinas naturales, destilados ligeros y combustibles para motores de encendido por chispa. Este método de prueba está diseñado para el análisis de combustibles destilados; no es aplicable a productos que contienen cantidades apreciables de material residual.

El método consiste en tomar una muestra de 100 ml del combustible a destilar. La destilación se realiza en una unidad de destilación discontinua de laboratorio a presión ambiente tal y como se muestra en la Figura 4.7. Este proceso consta de un matraz de destilación engler de un volumen aforado de 100 ml, un condensador de una longitud de 70 cm, un termómetro con un rango de temperatura de 0 °C hasta 410 °C, y una mantilla con un control de temperatura que va desde 0 °C hasta 450 °C, la cual sirve para proporcionar calor para el rompimiento de las moléculas del combustible. La muestra de 100 ml se vierte en el matraz engler, al cual se le inserta un bulbo en la parte superior, donde se coloca el termómetro el cual debe estar en el centro del bulbo, y alineado a una distancia del cuello de la salida del destilado.

Se realizan observaciones sistemáticas de lecturas de temperatura y volúmenes de condensado, según las necesidades del usuario de los datos. El volumen del residuo y las pérdidas también se registran. Los resultados de la prueba se expresan comúnmente como el porcentaje de evaporación o el porcentaje recuperado en función de la temperatura correspondiente, ya sea en una tabla o gráficamente, como un gráfico de la curva de destilación. En los resultados el IBP (*Initial Boiling point*, por sus siglas en inglés), es el punto inicial de ebullición que corresponde a la primera gota del destilado y el FBP (*Final Boiling point*, por sus siglas en inglés), es el punto final de ebullición.

Al final de la destilación, las temperaturas observadas se pueden corregir para la presión barométrica mediante la correlación propuesta por Young et al. [64] que se muestra a continuación:

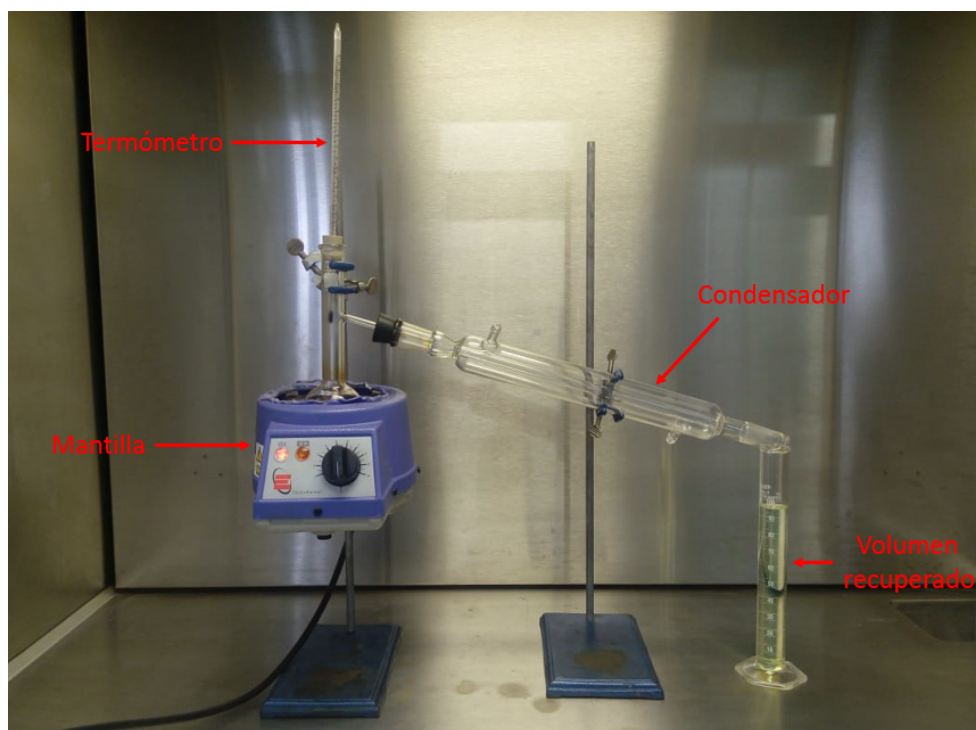


Figura 4.7: Componentes para realizar la destilación a nivel laboratorio.

$$T_c = T + 0.0009 \cdot (101.3 - P) \cdot (273 + T) \quad (4.1)$$

T_c = Temperatura corregida en °C.

T = Lectura de la temperatura observada en °C al momento de la destilación.

P = Presión barométrica a la que se encuentra durante la realización del proceso de destilación en kPa.

4.5.2 VISCOSIDAD CINEMÁTICA

La viscosidad cinemática fue obtenida a partir de la Ecuación 4.2 [65], la cuál tiene un rango de error entre el 5 y 10 %. Esta propiedad fue determinada a presión atmosférica, y a una temperatura de 40 °C.

$$\begin{aligned}
\log \nu_{40} = & 4.39371 - 1.94733 \cdot K + 0.127690 \cdot K^2 + 3.2629 \cdot 10^{-4} \cdot API^2 \\
& - 1.18246 \cdot 10^{-2} \cdot K \cdot API \\
& + \frac{0.17161 \cdot K^2 + 10.9943 \cdot API + 9.50663 \cdot 10^{-2} \cdot API^2 - 0.860218 \cdot K \cdot API}{API + 50.3642 - 4.78231 \cdot K}
\end{aligned} \tag{4.2}$$

ν_{40} = Viscosidad cinemática a 40 °C en cSt.

API = Gravedad API.

K = Factor de caracterizacion de Watson.

Determinación de gravedad API mediante la siguiente ecuación:

$$API = \frac{141.5}{GE} - 131.5 \tag{4.3}$$

GE = Gravedad especifica 60/60 °F.

K = Factor característico de Watson, determinado mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{M_e ABP^{1/3}}{GE} \tag{4.4}$$

Donde $M_e ABP$ es el punto de ebullición promedio en grados Rankine, el cual se determina de la siguiente manera:

$$M_e ABP = VABP - \Delta \tag{4.5}$$

VABP, es el punto de ebullición volumetrico, el cual se determinó mediante la Ecuación 4.6, se toma como el promedio de 5 temperaturas en °F, las cuales son obtenidas al 10, 30, 50, 70 y 90 % del volumen destilado recuperado.

$$VABP = \frac{T_{10} + T_{30} + T_{50} + T_{70} + T_{90}}{5} \tag{4.6}$$

Finalmente, el parámetro Δ se obtiene mediante la Ecuación 4.7.

$$\ln \Delta = -0.94402 - 0.00865 \cdot [VABP - 32]^{0.667} + 2.9979 \cdot \left[\frac{T_{90} - T_{10}}{90 - 10} \right]^{0.333} \tag{4.7}$$

4.5.3 Tensión superficial

Para el cálculo de la tensión superficial se utilizó la Ecuación 4.8, propuesta por Riazi y Al-Sahhaf [66], la cual se obtiene con el uso del peso molecular:

$$\sigma_{25} = 30.3 - \exp(17.45018 - 9.70188 \cdot M^{0.1}) \quad (4.8)$$

Donde σ_{25} es la tensión superficial a 25 °C, en dynes/cm. Esta ecuación tiene un rango de error entre el 0.25 y el 1.7 %.

El peso molecular se puede calcular a través de la Ecuación 4.9 [65]:

$$M = 42.965[\exp(2.097 \cdot 10^{-4} \cdot M_eABP - 7.78712 \cdot GE + 2.08476 \cdot 10^{-3} \cdot M_eABP \cdot GE)] \cdot M_eABP^{1.26007} \cdot GE^{4.98308} \quad (4.9)$$

Donde: M_eABP está en grados Kelvin.

4.5.4 DENSIDAD

La densidad a 20 °C se determinó mediante el método de correlación propuesta por Riazi y Al-Sahhaf mostrada en la Ecuación 4.10 [66], donde el error de esta ecuación está por debajo del 0.5 %.

$$\rho_{20} = 1.05 \exp(3.80258 - 312287 \cdot M^{0.1}) \quad (4.10)$$

Donde ρ_{20} es la densidad en g/cm³, y M es el peso molecular.

La correlación anterior es de gran ayuda cuando sólo se cuenta con el dato del peso molecular, el cual se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$M = 42.965 \left[\exp \left(2.097 \times 10^{-4} \cdot M_e ABP \cdot GE \right) + 2.08476 \times 10^{-3} \cdot M_e ABP \cdot GE \cdot M_e ABP^{1.26007} \cdot GE^{4.98308} \right] \quad (4.11)$$

Sin embargo, y de acuerdo a la norma ASTM D6751 de calidad del biodiésel, la cual establece la densidad a 15°C, se determinó la densidad a 60 °F, (15 °C) con el dato de la gravedad específica 60/60 °F mediante la Ecuación 4.12:

$$\rho_{15} = GE \cdot \rho_{agua} \quad (4.12)$$

4.5.5 MÉTODO DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA ASTM D1298-99

La norma ASTM D1298-99 [67], es un método de prueba para la determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) o comúnmente conocida como gravedad API de petróleo crudo, productos derivados del petróleo o mezclas de productos petroleros y no petrolíferos que normalmente se manejan como líquidos, y que tienen una presión de vapor Reid de 101.325 kPa (14.696 psi) o menos. La gravedad específica se puede determinar usando un hidrómetro (densímetro).

El método utilizado para determinar la gravedad específica de los combustibles objeto de estudio consta de una serie de pasos que consisten primeramente en: 1) tomar una probeta con 250 ml de la muestra y sumergir el hidrómetro de gravedad específica 60/60 °F, tal y como se muestra en la Figura 4.8, y posteriormente 2) dejar asentar este último en la probeta. Una vez que el hidrómetro permanece estático, se puede leer la escala del mismo. Es importante mencionar que al momento de realizar este procedimiento, la temperatura de la muestra y la probeta deben ser similares a la temperatura de referencia 60 °F o 15.56 °C, de lo contrario se hace una corrección del valor de la gravedad específica mediante la Ecuación 4.13:

$$GE = \frac{GE_T}{1 - [23 \times 10^6 \cdot (T - R) - 2 \times 10^{-8} \cdot (T - R)^2]} \quad (4.13)$$

GE = lectura de la gravedad específica a la temperatura de referencia (R) en °C.

GET = lectura de la gravedad específica a la temperatura observada (T) en °C.



Figura 4.8: Obtención de la gravedad específica.

CAPÍTULO 5

INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS MEZCLAS BINARIAS DIÉSEL-BIODIESEL SOBRE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO LÍQUIDO DE COMBUSTIBLE

A lo largo del presente capítulo se presentan los resultados de la influencia de las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiesel sobre los parámetros macroscópicos (i.e. penetración, ángulo y área) del chorro líquido de combustible. Para ello el presente capítulo se divide en seis secciones, en la primera se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de los combustibles objeto de estudio, en el segundo se muestra la evolución temporal del chorro líquido de combustible, en el tercero, cuarto y quinto, nos muestran los resultados del efecto de las propiedades físicas de los combustibles sobre la penetración, el ángulo y el área del chorro, respectivamente. Para finalizar, la última sección nos muestra las conclusiones encontradas en el presente capítulo.

5.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS COMBUSTIBLES

Es importante conocer las principales propiedades físicas de los combustibles objeto de estudio que influyen en el desarrollo del chorro líquido, y éste a su vez en el proceso de mezcla, combustión y posteriormente en las emisiones contaminantes. En la Sección 4.5 se vieron los métodos de obtención de las propiedades físicas de los combustibles a partir de la determinación de las curvas de destilación de los combustibles objeto de estudio, específicamente se obtuvo la densidad a 15 °C, la viscosidad a 40 °C, y la tensión superficial a 25 °C.

En la Figura 5.1, se presentan las curvas de las destilaciones que se obtuvieron para cada uno de los combustibles objeto de estudio, los cuáles son el diésel, y las mezclas binarias B05, B10 y B20. Cabe recordar que todas las destilaciones se realizaron con base en la norma ASTM D86-04 [63], la cual fue descrita en la Sección 4.5.1.

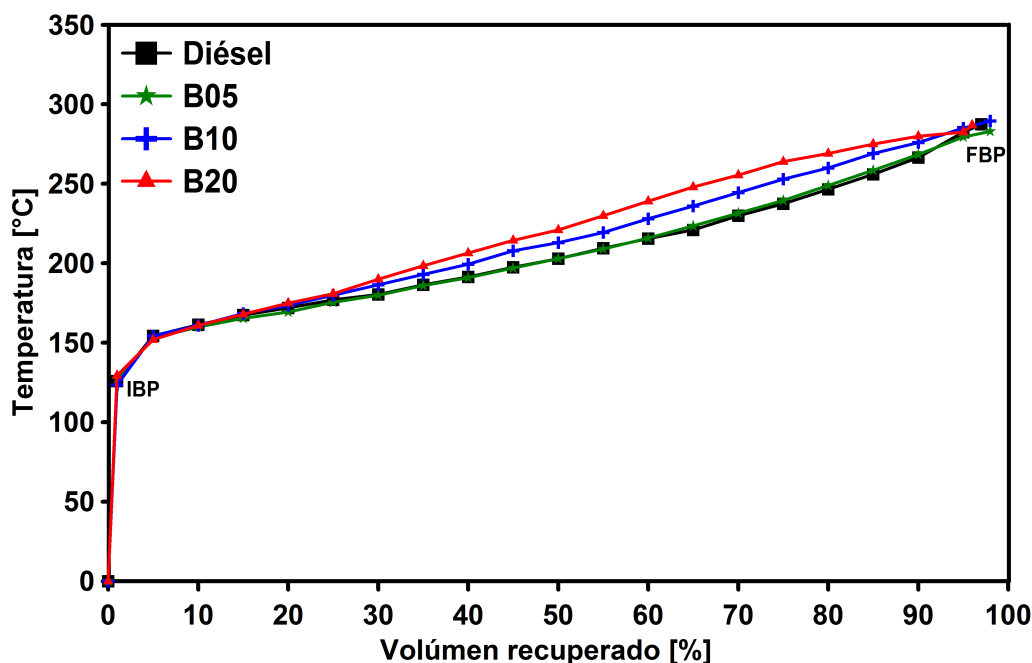


Figura 5.1: Curvas de destilación obtenidas con base en la Norma ASTM D86-04, para el diésel y las mezclas binarias B05, B10 y B20.

Las curvas de destilación de los cuatro combustibles empiezan en el IBP (*Initial Boiling Point*, por sus siglas en inglés), que se encuentran en un rango de temperaturas entre 123 y 130 °C, y se van tomando las temperaturas cada 5 % hasta terminar en el FBP (*Final Boiling Point*, por sus siglas en inglés), donde su rango de temperaturas se encuentra entre 283 y 290 °C. Las temperaturas observadas ya se encuentran corregidas mediante la Ecuación 4.1. Se puede observar que a mayor proporción de biodiesel en la mezcla, las temperaturas de volumen recuperado son más altas.

En la Tabla 5.1, se muestran las principales propiedades físicas de los combustibles objeto de estudio, específicamente la densidad a 15 °C que se determinó con una correlación a partir de la gravedad específica medida experimentalmente, la viscosidad a 40 °C y la tensión superficial a 25 °C, estas últimas se calcularon a partir de las correlaciones presentadas en la Sección 4.5.

Tabla 5.1: Propiedades físicas de los combustibles objeto de estudio.

Combustible	Densidad (Kg/m ³)	Viscosidad (mm ² /s)	Tensión superficial (mN/m)
Diésel	823.42	1.42	26.38
B05	825.95	1.44	26.42
B10	829.39	1.54	26.54
B20	832.54	1.64	26.69

La densidad y viscosidad dinámica de los cuatro combustibles (i.e. diésel, B05, B10, y B20), fueron medidos experimentalmente por parte del LaNDACBio sede Instituto Politécnico Nacional (IPN), a partir de estas dos propiedades se obtuvo la viscosidad cinemática, cabe mencionar que el diésel empleado por el IPN, es distinto al utilizado en el presente estudio. En la Tabla 5.2, se muestran los valores experimentales de estas dos propiedades.

Tabla 5.2: Propiedades físicas experimentales de los combustibles objeto de estudio.

Combustible	Densidad (Kg/m ³)	Viscosidad (mm ² /s)
Diésel	846.90	2.78
B05	848.15	2.81
B10	850.25	2.86
B20	854.15	2.99

Se compararon los valores de densidad y viscosidad de los combustibles utilizados en el presente estudio, con los obtenidos experimentalmente, para verificar la correcta aplicación de las correlaciones empíricas y los resultados fueron los siguientes:

- Los valores de densidad de los combustibles objeto de estudio están dentro del rango de valores típicos para el diésel, el cual es entre 820 - 845 Kg/m³ [13], y en comparación con valores de densidad medidos experimentalmente, tienen una incertidumbre promedio del 2.59 %, lo cual genera un valor confiable para el estudio. Diversos autores como Dimitrios N Tziourtzioumis et al. [68], reportan valores de densidad a 15 °C para el diésel y para la mezcla binaria B20 de 825 y 840 Kg/m³ respectivamente, cotejándolos con los reportados en este estudio tienen una desviación del 0.19 y 0.88 %. Xiangang Wang et al. [30], reportan valores de densidad a 15 °C para el diésel de 830 Kg/m³, comparándolo con el valor de densidad utilizado en el presente estudio, se obtiene una desviación del 0.79 %. José M. Desantes et al. [69], reportan un valor de densidad a 15 °C para la mezcla binaria B05 de 831 Kg/m³, con una desviación del 0.60 % en comparación con la de este estudio. Los valores de densidad reportados en este estudio son consistentes con lo reportado en la literatura.
- En cuanto a los valores de viscosidad cinemática de los combustibles objeto de estudio, los valores están por debajo del rango típico para el diésel, el

cual es entre 1.9 - 4.1 mm^2/s [13], esto debido a que el diésel no llega a las temperaturas características durante la destilación, es decir, su FBP está entre 285 y 290 °C, cuando comúnmente es alrededor de los 366 °C. Utilizando las temperaturas de la destilación de un diésel distinto que fue caracterizado por el LaNDACBio sede Instituto Politécnico Nacional, la correlación empleada en el presente estudio muestran valores de 2.76, 2.83, 2.62, y 3.25 mm^2/s , para el diésel, y las mezclas binarias B05, B10, y B20 respectivamente, valores similares a los medidos experimentalmente, con una incertidumbre entre lo teórico y lo experimental del 0.71, 0.71, 8.39, y 8.69 % para los combustibles anteriormente mencionados. Esto confirma que utilizando la correlación para la determinación de la viscosidad del combustible, se obtienen valores similares a los obtenidos experimentalmente, con una incertidumbre que está dentro de los límites que se presentaron en la Sección 4.5.2.

Algunos autores como Chengjun Du et al. [70], reportan valores de viscosidad cinemática a 40 °C del diésel de 2.2 mm^2/s , comparándolo con el valor reportado en el presente estudio, hay una incertidumbre del 35.45 %. José M. Desantes et al. [69], reportan un valor de viscosidad cinemática a 40 °C de la mezcla binaria B05 de 2.38 mm^2/s , cotejándolo con el valor de este estudio, hay una variación del 39.49 %. Dimitrios N Tziourtzioumis et al. [68], reportan valores de viscosidad cinemática a 40 °C para la mezcla binaria B20 de 3.039 mm^2/s , con una incertidumbre del 46.03 % en comparación con la reportada en este estudio. Cabe mencionar que las diferencias que existen entre lo reportado en este estudio y lo reportado en la literatura son consecuencia de las temperaturas no alcanzadas por el diésel durante su destilación, y no de las correlaciones utilizadas para determinar dicha propiedad, como ya se explicó con anterioridad.

- Al igual que con la viscosidad, los valores de tensión superficial de los combustibles objeto de estudio se ven afectados por las temperaturas no alcanzadas del diésel durante la destilación. Trabajos como el de Corral et al. [71], reportan un

valor de tensión superficial para el diésel de 27.84 mN/m, tomando como base este valor, se obtiene una incertidumbre del 5.24 %. Si se emplean las temperaturas de la destilación del diésel proporcionadas por parte del LaNDACBio sede Instituto Politécnico Nacional en la correlación utilizada en el presente estudio, se obtiene un valor de 27.87 mN/m, el cual tiene una incertidumbre del 0.10 %, lo cual indica que los valores obtenidos de tensión superficial de los combustibles son confiables para el estudio.

Algunos otros autores como Dimitrios N Tziourtzioumis et al. [68], y Pin-Chia Chen et al. [72], reportan valores de tensión superficial para la mezcla binaria B20 de 26.37 y 27.7 mN/m respectivamente, con una incertidumbre de 1.19 y 3.64 % para cada una de ellas, con respecto a los valores de tensión superficial reportados en este estudio.

5.2 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL CHORRO LÍQUIDO DE COMBUSTIBLE

Después de caracterizar los combustibles objeto de estudio, es decir, el diésel, y las mezclas binarias (B05, B10, y B20), se determinaron los parámetros de operación del sistema de inyección tomando como base las condiciones representativas de un sistema de inyección diésel common-rail, las cuáles se muestran en la Tabla 5.3 [73].

Tabla 5.3: Condiciones de operación representativas de un sistema de inyección diésel common-rail.

Parámetro de inyección	Cantidad	Unidades
Presión de inyección (P_{rail})	1000 – 1500	Bar
Contrapresión (P_{back})	50 – 80	Bar
Duración de pulso eléctrico	1000 – 2000	μ

Para estudiar la influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre los parámetros macroscópicos del chorro de combustible líquido, como lo son la penetración, el ángulo y el área, bajo una inyección simple, se seleccionaron 3 niveles de presión de inyección (P_{rail}) 500, 800 y 1300 bar, y tres niveles de contrapresión (P_{back}) 40, 50 y 60 bar, con un tiempo de energización del inyector diésel de 1500 μs . Todos los valores anteriormente mencionados, están entre el rango de valores que presentan los motores Diesel en la actualidad. La Tabla 5.4 muestra la matriz de experimentos que se llevaron a cabo en el presente estudio para ver la influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre los parámetros macroscópicos del chorro de combustible líquido.

Tabla 5.4: Matriz de experimentos para el estudio de la influencia de las propiedades físicas de las mezclas diésel-biodiesel sobre los parámetros macroscópicos del chorro de combustible líquido, bajo una inyección simple.

P_{rail} (bar)	P_{back} (bar)	T.E (ms)	Combustible	Tipo de inyector
500, 800 y 1300	40,50 y 60	1.5	Diésel	Solenoides
500, 800 y 1300	40,50 y 60	1.5	B05	Solenoides
500, 800 y 1300	40,50 y 60	1.5	B10	Solenoides
500, 800 y 1300	40,50 y 60	1.5	B20	Solenoides

En la Figura 5.2, se muestra la evolución temporal del chorro líquido de combustible para un caso en específico con las siguientes condiciones de operación: un nivel de P_{rail} de 1300 bar, un nivel de P_{back} de 60 bar y un tiempo de energización de 1.5 ms, para las mezclas binarias B05, B10, B20 y el diésel de referencia. En la Figura 5.2 a), se muestra la evolución temporal de la penetración del chorro líquido, en la Figura 5.2 b), se muestra la evolución temporal del ángulo del chorro líquido, y en la Figura 5.2 c), se muestra la evolución temporal del área del chorro líquido.

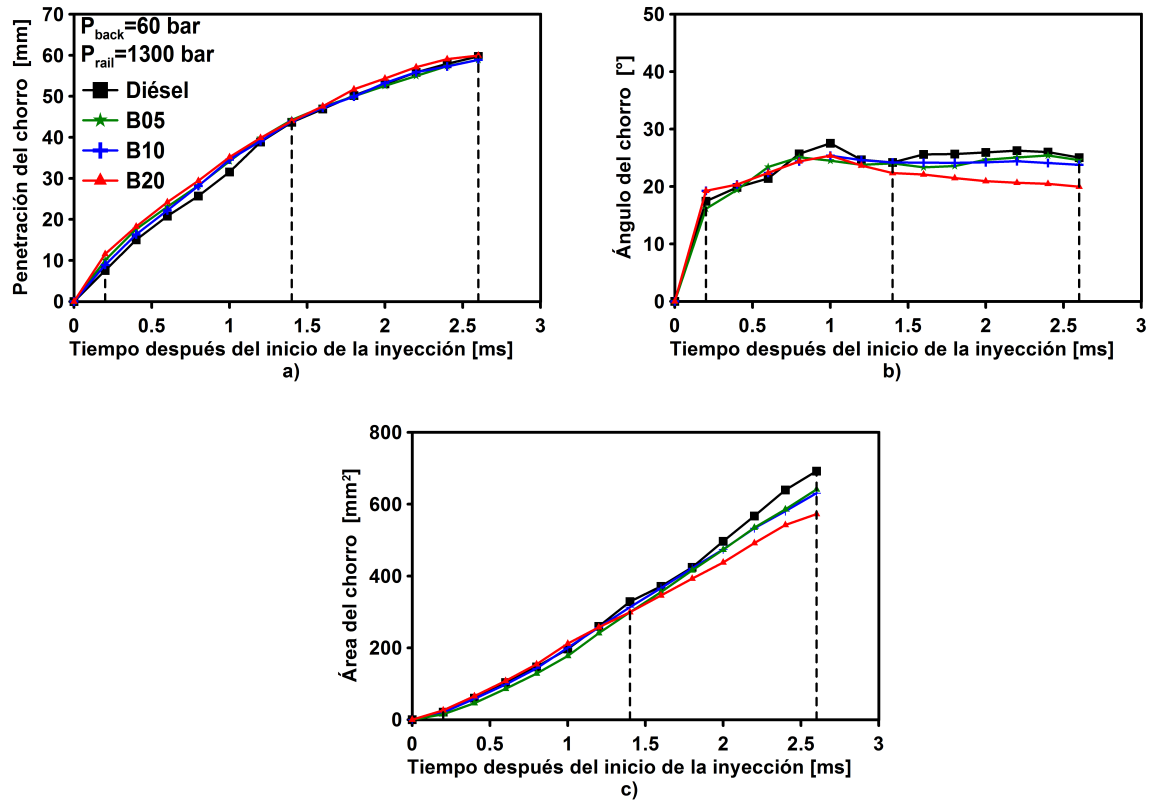


Figura 5.2: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro líquido de combustible para un nivel de P_{rail} de 1300, un nivel de P_{back} de 60 bar, y un tiempo de energización de 1.5 ms para los combustibles estudiados. a) penetración, b) ángulo y c) área del chorro.

Con el fin de analizar la influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre los parámetros macroscópicos del chorro líquido de combustible, se seleccionaron tres instantes de tiempo, los cuáles han sido señalados en la Figura 5.2, a través de líneas verticales discontinuas de color negro; concretamente los tres instantes de tiempo seleccionados fueron: 0.2 ms, tiempo correspondiente al inicio del evento de inyección, en este momento el chorro empieza a formarse, 1.4 ms, tiempo correspondiente a la mitad del evento de inyección, en este instante el chorro está en pleno desarrollo, y 2.6 ms, tiempo correspondiente al final del evento de inyección, en este momento el chorro está completamente formado. Cabe señalar que el comportamiento del caso específico mostrado en la Figura 5.2, es representativo de las otras condiciones de operación objeto de estudio; es por ello que con el fin de simplificar la información se ha mostrado sólo uno de los casos estudiados.

5.3 EFECTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS COMBUSTIBLES EN LA PENETRACIÓN DEL CHORRO LÍQUIDO

En las Figuras 5.3, 5.4 y 5.5 se muestra el comportamiento de la penetración del chorro obtenido a tres diferentes tiempos de la evolución temporal del chorro de combustible, es decir en a) se representa el inicio del evento de inyección a la 0.2 ms, en b) se representa justo a la mitad del evento de inyección que es a los 1.4 ms y en c) se muestra el final del evento de inyección que es a los 2.6 ms; en función de tres diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800 y 1300 bar), para cada uno de los niveles de P_{back} (i.e. 40, 50 y 60 bar), y combustibles estudiados (i.e. mezclas binarias B05, B10 Y B 20, y el diésel de referencia).

En la Figura 5.3, se puede observar en todos los casos, que conforme aumenta la presión de inyección, se van incrementando los valores de la penetración del chorro líquido, esto se le atribuye a que en cuanto mayor es el nivel de presión de inyección, mayor es el caudal másico de combustible, por lo tanto al haber mayor masa de combustible aumenta el flujo de cantidad de movimiento, lo cual hace que éste salga a mayor velocidad, y penetre de manera más rápida sobre el gas que lo rodea [74].

Para los niveles de P_{rail} de 500 y 800 bar al inicio y a la mitad de la inyección, es decir, a los 0.2 ms y 1.4 ms, ASOI (*After Start Of Injecton*, por sus siglas en inglés), las propiedades físicas de los combustibles tienen una mayor influencia que al final de la inyección que es a los 2.6 ms, esto se debe específicamente que, a mayor viscosidad en el combustible hace más lento el levantamiento de la aguja del inyector, provocando un retraso hidráulico que afecta la aerodinámica del chorro líquido en la inyección temprana [69]. Mientras que para el nivel de P_{rail} de 1300 bar, las mezclas binarias diésel-biodiesel se comportan de una manera similar en el instante 0.2 y 1.4 ms ASOI, a pesar de tener diferentes propiedades físicas, debido a que conforme aumenta la presión de inyección va disminuyendo el retraso hidráulico por consecuencia de un aumento de momentum en el combustible [75]. Al finalizar la inyección, es decir, en el instante de 2.6 ms ASOI, la mezcla B20 es la que logra mayores niveles de penetración debido que tiene una mayor densidad en comparación con las otras mezclas binarias diésel-biodiesel.

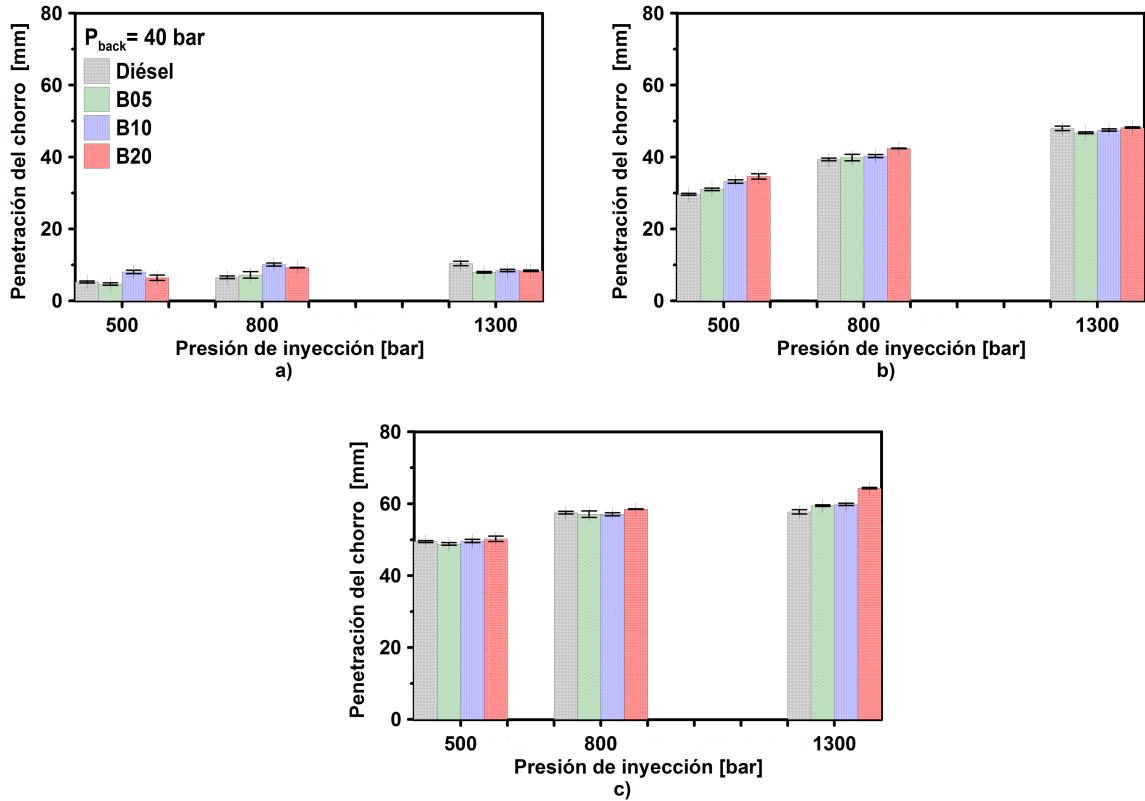


Figura 5.3: Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre la penetración del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 40 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.

En la Figura 5.4 a), se puede observar que la mezclas binarias B05 y B10 se comportan de la misma manera para los tres niveles de presión de inyección, mientras que el en inciso b) para los niveles de P_{rail} de 500 y 800 bar se observa un incremento en los valores de penetración conforme aumenta la proporción de biodiesel en las mezclas debido a que los combustibles con mayor proporción de biodiesel tienen mayor densidad, por lo que al contener mayor masa de combustible genera una presión mayor sobre el gas que lo rodea dentro de la cámara, mientras que para el caso del nivel de P_{rail} de 1300 todos los combustibles tienen aproximadamente valores de penetración similares. En el inciso c), el cuál corresponde al final de la inyección, la mezcla binaria B20 tiene mayores niveles de penetración para los tres

niveles de P_{rail} mientras que el diésel y las mezclas binarias B05 y B10 parecen tener una tendencia muy similar.

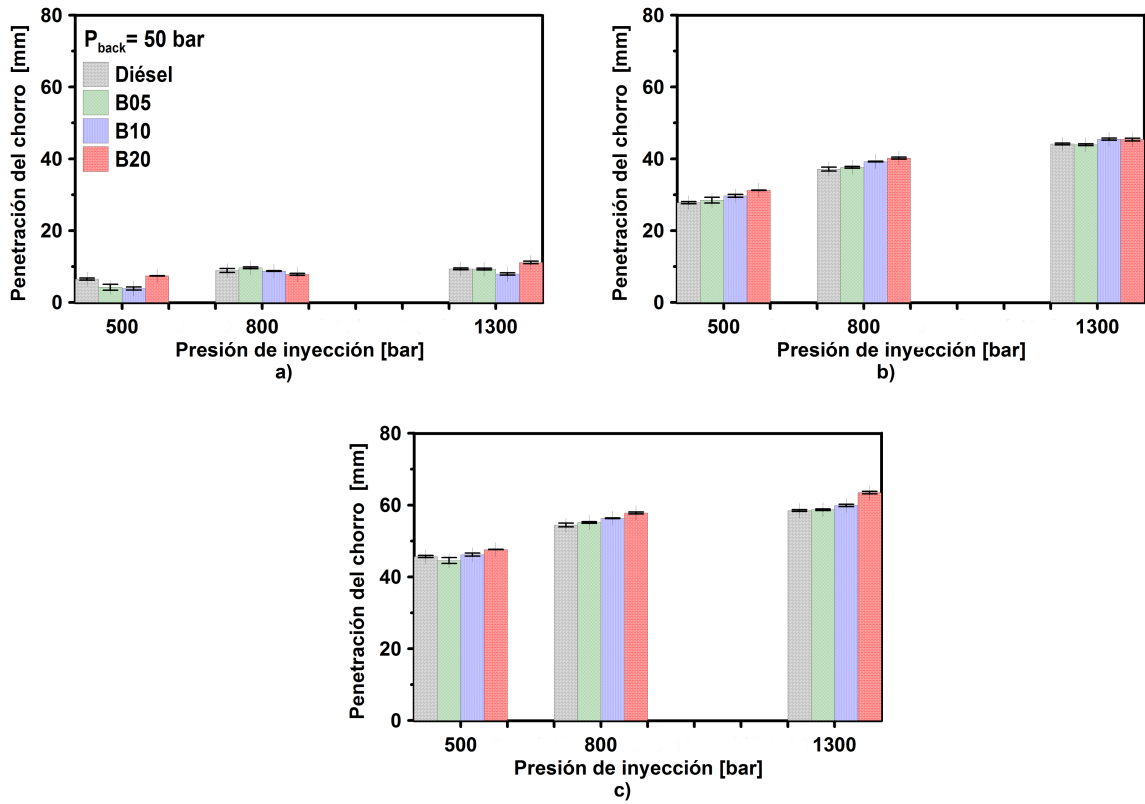


Figura 5.4: Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre la penetración del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 50 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.

En la Figura 5.5 a), la mezcla B20 es la que presenta mayores niveles de penetración en comparación a los otros combustibles, pero conforme va evolucionando el chorro de combustible esas diferencias en los niveles de penetración parecen acortarse en todas las mezclas binarias. En los incisos b) y c) el nivel de P_{rail} de 500 bar es donde se observa una diferencia en los niveles de penetración conforme aumenta el porcentaje de biodiesel en las mezclas, mientras que para los niveles de P_{rail} de 800 y 1300 bar, los valores de penetración son muy similares.

La P_{back} de 60 bar parece tener también una influencia sobre las propiedades físicas de los combustibles ya que para los niveles de P_{rail} de 800 y 1300 a la mitad y al final de la inyección todos los combustibles parecen tener valores de penetración similares.

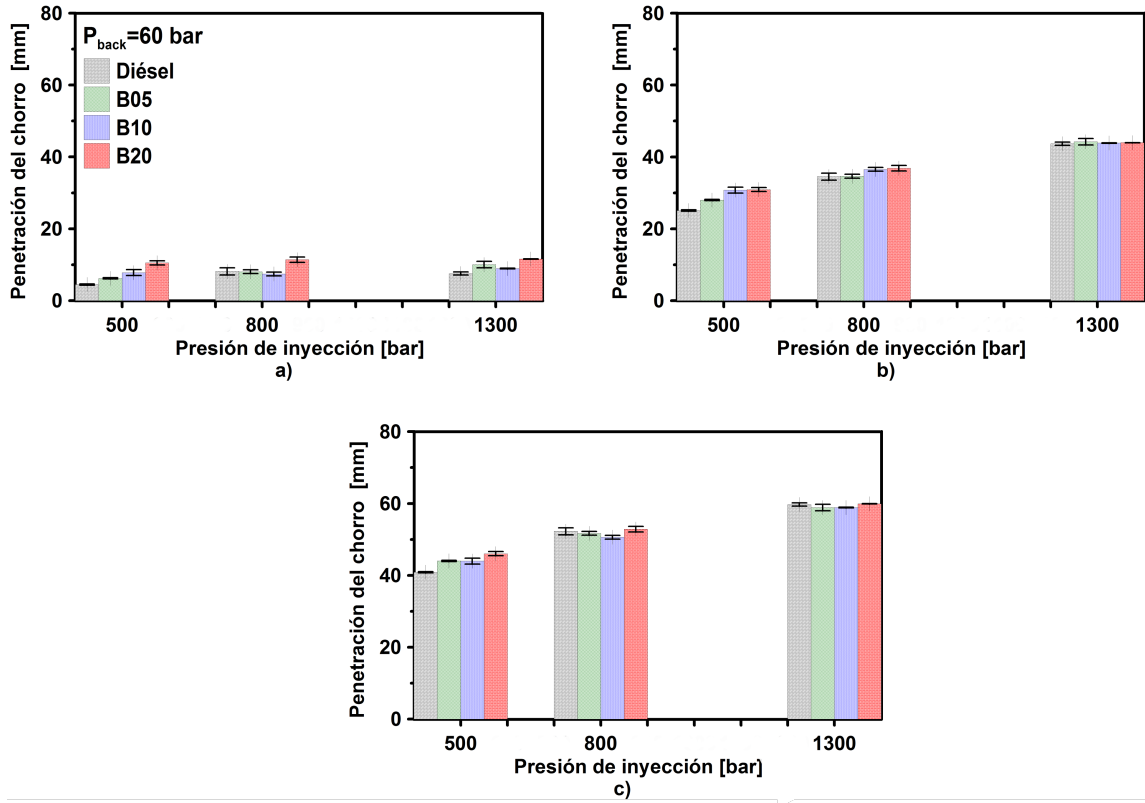


Figura 5.5: Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre la penetración del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 60 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.

5.4 EFECTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS COMBUSTIBLES SOBRE EL ÁNGULO DEL CHORRO LÍQUIDO

En las Figuras 5.6, 5.7 y 5.8 se muestra el comportamiento del ángulo del chorro obtenido a tres diferentes tiempos de la evolución temporal del chorro de combustible, es decir, en los incisos a) se representa el inicio de la inyección a los 0.2 ms, los incisos b) se representa justo a la mitad del evento de inyección que es a los 1.4 ms y en los incisos c) se muestra el final de la inyección que es a los 2.6 ms, en función de tres diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800 y 1300 bar), para cada uno de los niveles de P_{back} (i.e. 40, 50, y 60 bar), y combustibles estudiados (i.e. mezclas binarias, B05, B10 y B20, y el diésel de referencia).

En la Figura 5.6 a), se pueden observar menores valores de ángulo del chorro de combustible en comparación a los incisos b) y c), esto se debe a que a los 0.2 ms ASOI el chorro de combustible todavía no alcanza su estabilización. En general para los tres niveles de P_{rail} y al inicio de la inyección, se tiene un mayor valor del ángulo del chorro para el diésel, en comparación a las mezclas binarias (i.e. B05, B10, y B20). Cabe señalar que con la mezcla binaria B20 se tienen menores valores del ángulo del chorro, esto es debido a su mayor valor de viscosidad y tensión superficial en comparación con los que se tienen con el diésel, reflejándose esto en un mal proceso de mezcla [76]. Conforme va evolucionando el chorro de combustible es decir al pasar de 1.4 ms ASOI a 2.6 ms ASOI, los valores del ángulo del chorro tienden a ser similares para el nivel de P_{rail} de 1300 bar.

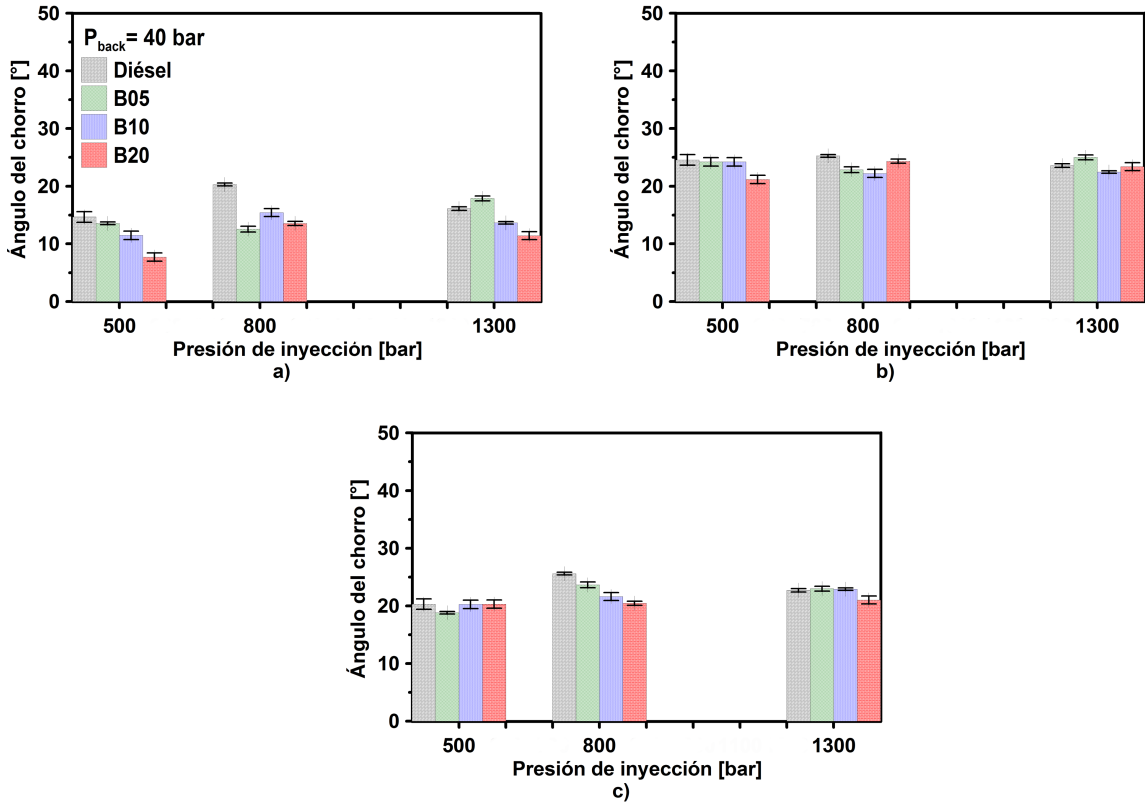


Figura 5.6: Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre el ángulo del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 40 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.

En la Figura 5.7 a), se puede observar que para el diésel y para el nivel de P_{rail} de 1300 bar se tiene un mayor valor del ángulo del chorro en comparación a los otros combustibles estudiados. En el inciso b) que es cuando el chorro de combustible llegó a su estabilización, se observa un comportamiento similar del ángulo de chorro de combustible para las mezclas binarias, a pesar de que éstas tienen una mayor densidad, viscosidad, y tensión superficial en comparación a las del diésel. Una vez que el chorro de combustible alcanza los 2.6 ms ASOI, el diésel y la mezcla binaria B05 presentan un comportamiento similar del ángulo del chorro, mientras que las mezclas binarias B10 y B20 tienen menores valores del ángulo del chorro con respecto al diésel, debido a las diferencias en los valores de viscosidad y tensión superficial.

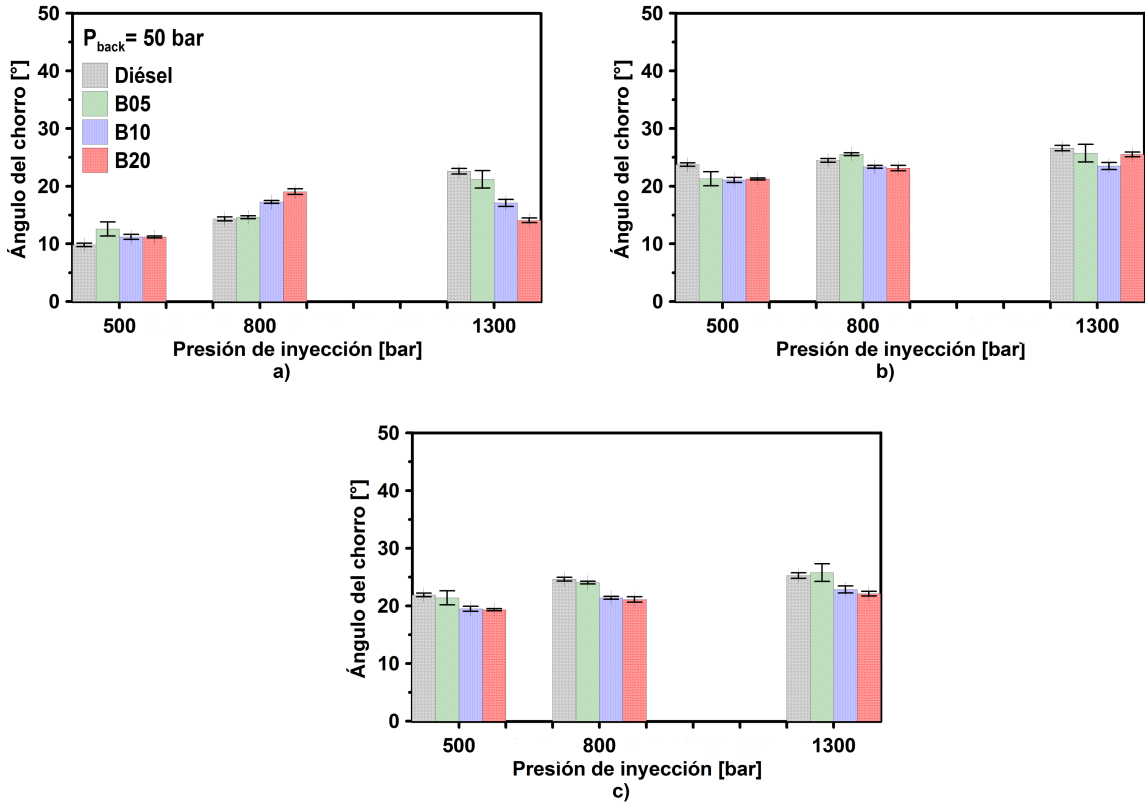


Figura 5.7: Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre el ángulo del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 50 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.

En la Figura 5.8 a), se puede observar que los valores del ángulo del chorro para las mezclas binarias B05, B10, el diésel, y para los niveles de P_{rail} de 500 y 800 bar son similares. En el inciso b) que es el instante en el que chorro de combustible a alcanzado la mitad de su desarrollo, no hay una diferencia significativa en los valores del ángulo del chorro para las mezclas binarias en comparación con los del diésel, Y en el inciso c), que es el momento en el que el chorro de combustible a alcanzado máximo desarrollo, se observa que para los niveles de P_{rail} de 500 y 800 bar, el diésel presenta mayores valores de ángulos del chorro en comparación a los otros combustibles, mientras que para un nivel de P_{rail} de 1300 bar, las mezclas binarias B05, B10 y diésel siguen presentando una tendencia similar del ángulo del chorro

a la observada a la mitad del desarrollo del chorro de combustible, es decir valores del ángulo del chorro similares, en cuanto a la mezcla binaria B20, ésta presenta un menor valor de ángulo del chorro.

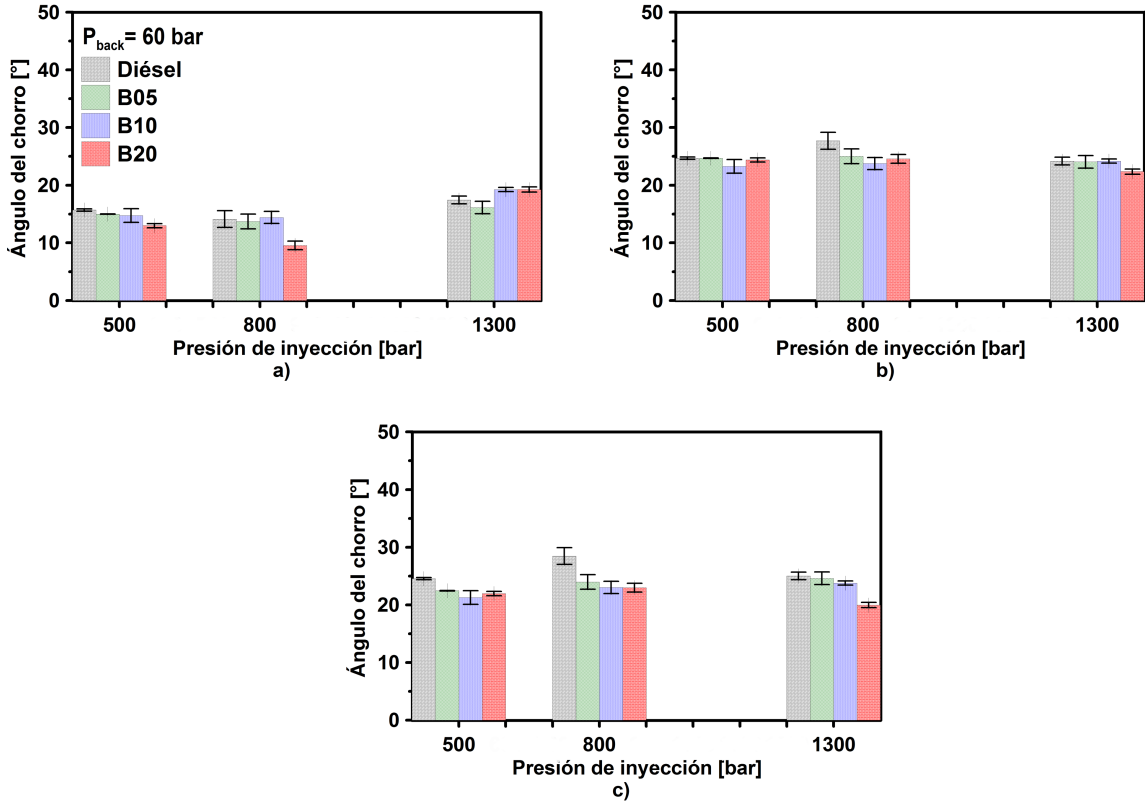


Figura 5.8: Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre el ángulo del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 60 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.

Conforme aumenta el nivel de P_{back} , se incrementa el valor del ángulo del chorro para los niveles de P_{rail} de 500 y 800 bar, sobretodo este efecto es notorio al final de la inyección para todos los combustibles, esto se debe a que hay una mayor densidad del ambiente, por lo tanto, el desarrollo del chorro en la dirección axial se ve disminuido, lo que obliga al chorro a desarrollarse en dirección radial [32, 77]. Para un nivel de P_{rail} de 1300 bar, esta diferencia deja de ser tan significativa.

5.5 EFECTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS COMBUSTIBLES SOBRE EL ÁREA DEL CHORRO LÍQUIDO

En las Figuras 5.9, 5.10 y 5.11, se muestra el comportamiento del área del chorro obtenido a tres diferentes tiempos de la evolución temporal del chorro de combustible, es decir en los incisos a) se representa el inicio de la inyección a la 0.2 ms, los incisos b) se representa justo a la mitad del evento de inyección que es a los 1.4 ms y en los incisos c) se muestra el final de la inyección que es a los 2.6 ms, en función de tres diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800 y 1300 bar), para cada uno de los niveles de P_{back} (i.e. 40, 50, y 60 bar), y combustibles estudiados (i.e. mezclas binarias, B05, B10 y B20, y el diésel de referencia).

En la Figura 5.9, se puede observar que el diésel es el que presenta mayores valores de área de chorro, en todos los niveles de presión de inyección durante los tres diferentes tiempos de la evolución temporal del chorro de combustible; esto se debe a que este combustible fue el que presentó mayores valores del ángulo del chorro debido a su baja viscosidad en comparación al de las mezclas binarias diésel-biodiésel, lo cual hace que la superficie de contacto del chorro líquido con el aire sea mayor, conduciendo a un mejor proceso de mezcla. También se puede observar que conforme aumenta el nivel de presión de inyección para todos los combustibles los valores del área del chorro aumentan, esto debido a que al aumentar la presión de inyección se incrementa la masa de combustible inyectada, provocando penetrar más a través del gas que lo rodea, reflejándose en una mayor superficie entre el combustible y el gas, lo cual es consistente con lo reportado por Hongzhan Xie et al [32].

A los 0.2 y 1.4 ms ASOI, los valores del área del chorro correspondientes a las mezclas binarias B05, B10, y B20 tuvieron un comportamiento similar, mientras que a los 2.6 ms ASOI, los valores del área del chorro correspondiente a la mezcla binaria B20 fueron menores, esto debido a su mayor viscosidad, en comparación a las otras mezclas binarias de combustible.

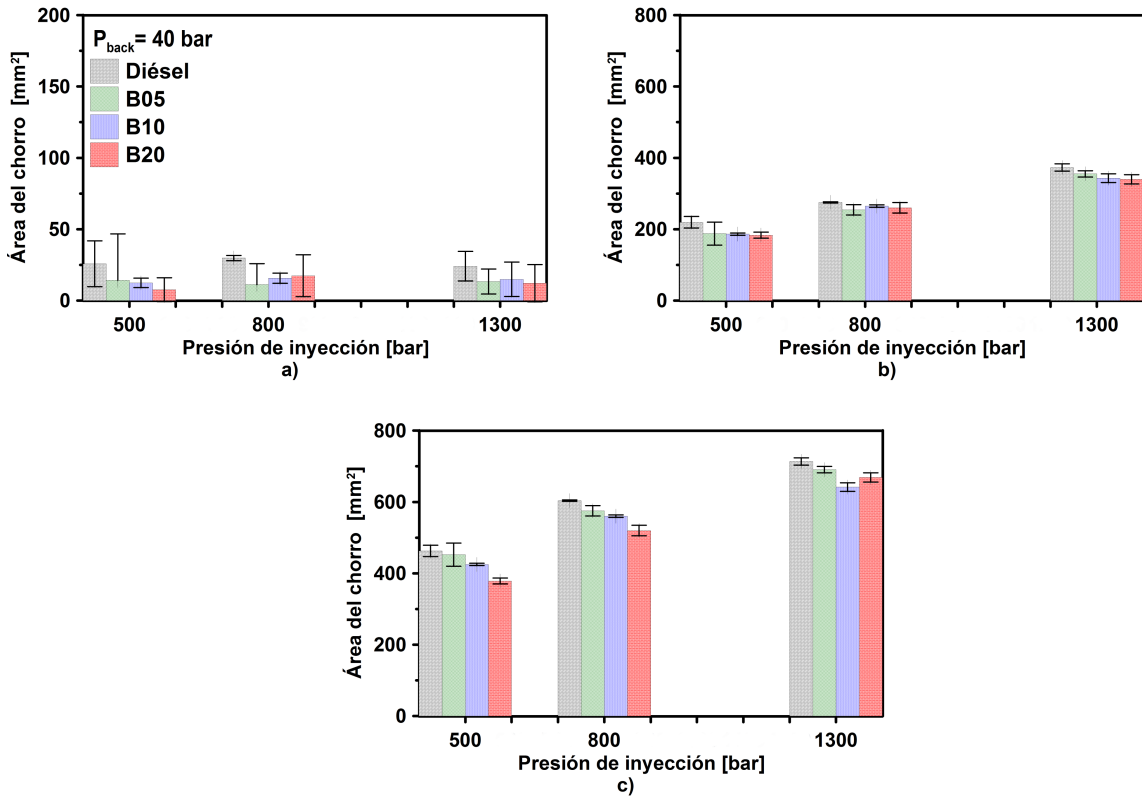


Figura 5.9: Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre el área del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 40 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.

En la Figura 5.10, se observa que a los 0.2 y 1.4 ms ASOI, los valores del área del chorro del diésel se mantienen ligeramente más altos en comparación al de las mezclas binarias B05, B10, y B20, mientras que los valores del área del chorro de las mezclas binarias son en general similares para todos los niveles de presión de inyección. En el instante 2.6 ms ASOI, el diésel presentó mayores valores del área

del chorro, debido a lo comentado anteriormente, el diésel presenta un mejor proceso de atomización en comparación con los otros combustibles estudiados, debido a su baja viscosidad, provocando un mayor valor del ángulo del chorro, y una mayor área de contacto entre el combustible y el gas. Al igual que en la Figura 5.9, se puede observar que al aumentar la presión de inyección se tiene un incremento en los valores del área del chorro para todos los combustibles.

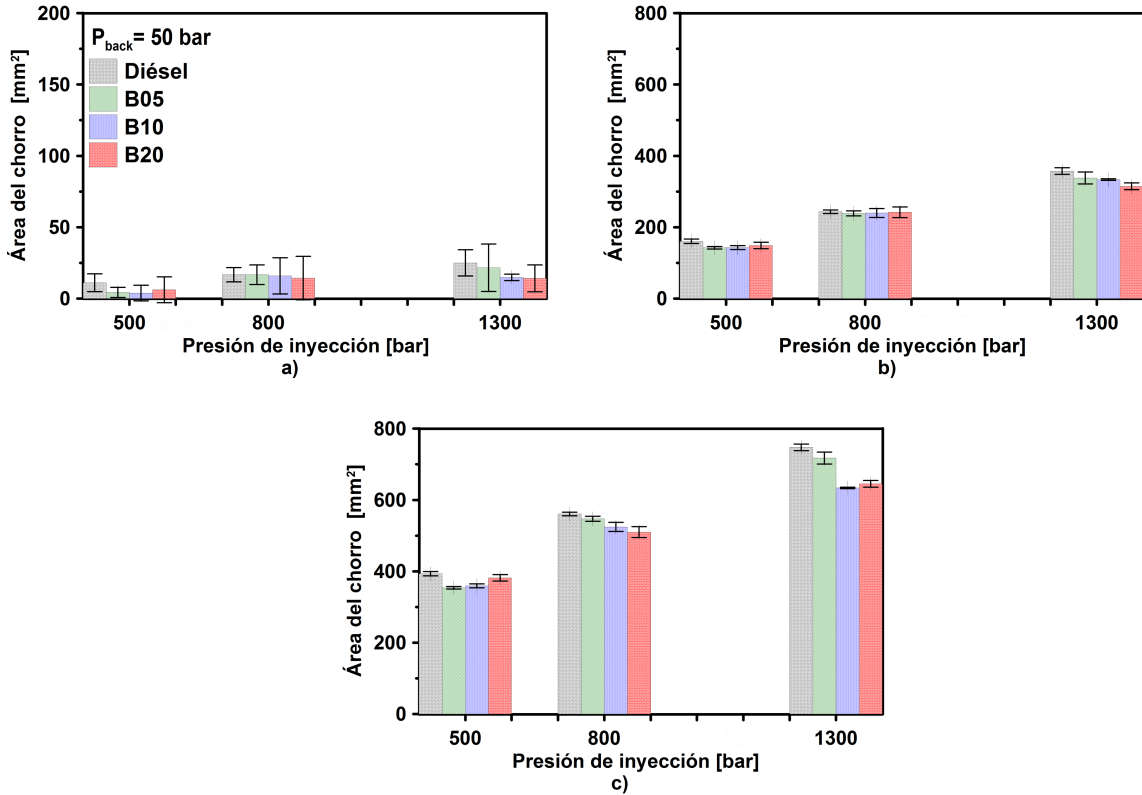


Figura 5.10: Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre el área del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 50 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.

En la Figura 5.11, se puede observar que el comportamiento de los valores del área del chorro para las mezclas binarias B05, B10, y B20, y a los 0.2 y 1.4 ms ASOI es similar, mientras que los valores del área del chorro correspondiente al diésel son ligeramente mayores a los de las mezclas binarias. A los 2.6 ms ASOI,

se puede observar que conforme se incrementa el nivel de presión de inyección, se tienen mayores valores del área del chorro del diésel, esto es debido, por un lado, a la elevada contrapresión en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante, esto se refleja que el chorro líquido penetre lentamente en el interior de la maqueta, y por otro lado, por la menor viscosidad del diésel en comparación al de las mezclas binarias, generando un mayor ángulo del chorro.

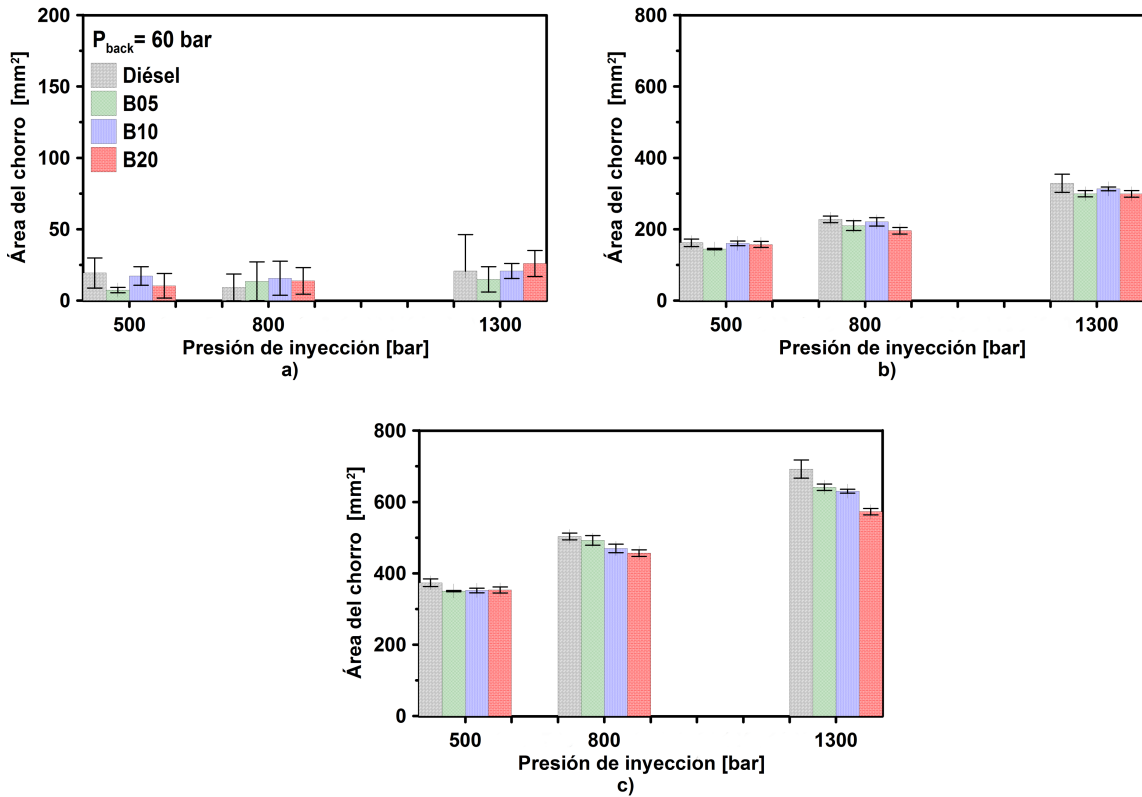


Figura 5.11: Influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre el área del chorro líquido bajo diferentes niveles de P_{rail} (i.e. 500, 800, y 1300 bar), a un nivel de P_{back} de 60 bar, y a diferentes isotiempos: a) 0.2 ms ASOI, b) 1.4 ms ASOI, y c) 2.6 ms ASOI.

Al comparar de manera general los parámetros macroscópicos de las mezclas binarias diésel-biodiesel (i.e. B05, B10, y B20) con los del diésel de referencia, bajo todas las condiciones de operación anteriormente mencionadas, se observó que los parámetros macroscópicos de la mezcla binaria B10 tienen un comportamiento simi-

lar a los del diésel, es decir, el proceso de mezcla de estos dos combustibles es similar, bajo un nivel de P_{rail} de 1300 bar, y un nivel de P_{back} de 60 bar, tal como se muestra en la Tabla 5.5, por consiguiente la mezcla binaria B10 puede ser implementada en los motores Diesel actuales.

Tabla 5.5: Parámetros macroscópicos del chorro líquido de la mezcla binaria B10 con respecto al diésel, bajo un nivel de P_{rail} de 1300 bar, y un nivel de P_{back} de 60 bar, para los tres iso-tiempos estudiados.

	Penetración			Ángulo			Área		
	(mm)			(°)			(mm ²)		
	0.2	1.4	2.6	0.2	1.4	2.6	0.2	1.4	2.6
	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)
Diésel	7.55	43.67	59.73	17.43	24.18	25.02	20.75	328.74	692.08
B10	8.93	43.84	58.87	19.24	24.18	23.77	20.68	313.16	630.26

5.6 CONCLUSIONES

A lo largo del presente capítulo, se ha profundizado en el conocimiento de los efectos que tienen las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiesel sobre los parámetros macroscópicos del chorro líquido (i.e. penetración, ángulo, y área), bajo una inyección simple. A partir del cual se sintetizan las conclusiones alcanzadas en el presente capítulo.

- Para todos los niveles de contrapresión y todos los combustibles, al aumentar la presión de inyección se ha observado un incremento en los valores de penetración del chorro, debido a que es mayor la masa de combustible que se inyecta, por lo tanto genera mayor presión sobre el aire de la atmósfera que lo rodea.
- Conforme se aumenta la proporción de biodiesel en las mezclas binarias se ha observado un incremento en la densidad del combustible, la cual provoca mayores niveles de penetración del chorro para la mezcla binaria B20 en comparación a los otros combustibles objeto de estudio, esto debido a que contiene mayor masa de combustible por unidad de volumen, lo que conlleva a ejercer una mayor presión sobre el gas circundante y avanzar más a través del propio gas.
- Otra de las propiedades físicas que influye sobre la penetración del chorro de combustible es la viscosidad y tensión superficial, conforme se incrementa la proporción de biodiesel en las mezclas binarias, se ha observado un incremento en estas dos propiedades físicas, las cuales afectan negativamente al proceso de atomización del combustible.
- Conforme se aumentan los niveles de contrapresión dentro de la cámara de visualización a volumen constante, se ha observado una disminución en los valores de la penetración del chorro para todos los combustibles, esto debido a que existe una mayor oposición al movimiento del chorro líquido de combustible.

- Conforme se incrementa el nivel de presión de inyección para el caso de una contrapresión de 60 bar, no se han observado diferencias significativas en los valores de la penetración del chorro líquido para los diferentes combustibles estudiados, específicamente para el caso de un nivel de P_{rail} de 1300 bar, y en los instantes de 1.4 y 2.6 ms ASOI, por consiguiente, se puede concluir que bajo estas condiciones de operación, las propiedades físicas de los combustibles dejan de tener un efecto significativo sobre el chorro líquido.
- En general el diésel es el que presenta mayores valores de ángulo del chorro líquido en comparación a los otros combustibles estudiados, esto debido a que es el que presenta una menor viscosidad. Esta última propiedad física, desfavorece al proceso de atomización del combustible, es decir, a la desintegración de éste en pequeñas gotas. Por otro lado, la mezcla binaria de mayor proporción de biodiesel (B20), provoca menores valores de ángulo del chorro, consecuencia de su alta viscosidad, desfavoreciendo al proceso de mezcla.
- Para las condiciones de operación de un nivel de P_{rail} de 1300 bar, y un nivel de P_{back} de 60 bar, las mezclas binarias B05 y B10, generan valores del ángulo del chorro similares a los del diésel, en los instantes de 1.4 y 2.6 ms ASOI.
- El diésel fue el combustible que mostró mayores valores de área del chorro para todos los niveles de P_{rail} y durante toda la evolución temporal del chorro, en comparación a los otros combustibles estudiados. Este comportamiento se debe a que la baja viscosidad y tensión superficial del diésel, favorecen al proceso de atomización, generando una mayor distribución del combustible en el gas, favoreciendo al proceso de mezcla.
- Para todos los niveles de P_{back} , se ha observado que conforme aumenta el nivel de P_{rail} , los valores del área del chorro incrementan para todos los combustibles estudiados, esto es debido a que se inyecta una mayor masa de combustible y genera una penetración más profunda del chorro líquido, lo que genera una mayor superficie de contacto con el gas en el interior de la cámara.

- Al comparar de manera global los parámetros macroscópicos del chorro diésel líquido correspondientes a las mezclas binarias (i.e. B05, B10, y B20) con los del diésel, bajo las condiciones de operación: un nivel de P_{rail} de 1300 bar, y un nivel de P_{back} de 60 bar, se observó que con la mezcla binaria B10 se tiene un proceso de mezcla similar al del diésel, por consiguiente, esta mezcla binaria puede ser implementada en los motores Diesel actuales.

CAPÍTULO 6

EFECTOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL COMBUSTIBLE SOBRE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO LÍQUIDO DE COMBUSTIBLE BAJO UNA ESTRATEGIA DE INYECCIÓN PILOTO

A lo largo de este capítulo, se presentan los resultados obtenidos de los efectos de las propiedades físicas del combustible sobre los parámetros macroscópicos (i.e. penetración, ángulo, y área) del chorro líquido, bajo una estrategia de inyección piloto. Para ello el capítulo se divide en cuatro secciones, en la primera se muestra la evolución temporal del chorro líquido para el diésel y para la mezcla binaria B10, en la segunda sección se describe el efecto de la estrategia de inyección piloto sobre los parámetros macroscópicos utilizando diésel. En la tercera sección se describe el efecto de las propiedades de la mezcla binaria B10 bajo una estrategia de inyección piloto, por último, se describen las conclusiones más relevante del presente capítulo.

Para estudiar la influencia de las propiedades físicas de los combustibles sobre los parámetros macroscópicos del chorro líquido (i.e. penetración, ángulo, y área) bajo una estrategia de inyección piloto, se instaló un amplificador de potencia para controlar inyector de diésel de tipo solenoide (GENOTEC), el cuál se describe a detalle en el Anexo A.

Para el presente estudio primeramente es necesario conocer la influencia de la propia inyección piloto sobre la principal utilizando el diésel de referencia, para ello se seleccionaron las condiciones de operación de un caso de la sección anterior, éstas fueron las siguientes: un nivel de P_{rail} de 1300 bar, un nivel de P_{back} de 40 bar, y tres diferentes niveles de dwell time, 1.5, 2.0, y 3.5 ms respectivamente, los cuales son similares a los analizados en el trabajo desarrollado por Borrego S. [78], en donde encontró tres comportamientos distintos: 1) con un dwell time de 1.5 ms, la inyección piloto provoca un efecto negativo en el proceso de mezcla, 2) con un dwell time de 2.0 ms, la inyección piloto beneficia el proceso de mezcla, y 3) con un dwell time de 3.5 ms la inyección piloto no influye sobre el proceso de mezcla. Cabe mencionar que estos tres comportamientos se observaron utilizando el diésel de referencia, para dar continuidad al trabajo anterior, en el presente estudio además de emplear el diésel de referencia, se empleó una mezcla binaria diésel-biodiesel B10, la cual se observó en el Capítulo 5, que tiene un proceso de mezcla similar al del diésel, y así poder averiguar el efecto de las propiedades físicas.

La Tabla 6.1 muestra la matriz de ensayos que se estableció para estudiar la influencia de las propiedades físicas de la mezcla binaria diésel-biodiesel B10 sobre los parámetros macroscópicos del chorro de combustible líquido, bajo una estrategia de inyección piloto.

Tabla 6.1: Matriz de experimentos para el estudio de la influencia de las propiedades físicas de la mezcla binaria diésel-biodiesel B10 sobre los parámetros macroscópicos del chorro de combustible líquido, bajo una estrategia de inyección piloto.

Prail (bar)	Pback (bar)	Inyección piloto (ms)	Dwell time (ms)	Inyección principal (ms)	Inyección simple	Combustible
1300	40	0.5	1.5	1.5	-	Diésel y B10
1300	40	0.5	2.0	1.5	-	Diésel y B10
1300	40	0.5	3.5	1.5	-	Diésel y B10
1300	40	-	-	-	1.5	Diésel y B10

6.1 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL CHORRO LÍQUIDO DE COMBUSTIBLE BAJO UNA ESTRATEGIA DE INYECCIÓN PILOTO PARA EL DIÉSEL Y LA MEZCLA BINARIA B10

En la Figura 6.1, se muestra la evolución temporal de los parámetros macroscópicos (i.e. penetración, ángulo y área) del chorro líquido de combustible diésel bajo una estrategia de inyección piloto bajo las siguientes condiciones de operación: un nivel de P_{rail} de 1300 bar, un nivel de P_{back} de 40 bar, un tiempo de energización de la inyección piloto de 0.5 ms, un tiempo de energización de la inyección principal de 1.5 ms tres diferentes dwell time, 1.5, 2.0 y 3.5 ms, respectivamente. También se muestra la evolución temporal de una inyección simple de referencia, bajo los mismos niveles de P_{rail} y P_{back} que los empleados en la estrategia de inyección piloto, y con un tiempo de energización de 1.5 ms, como se puede observar en la Tabla 6.1. Con la finalidad de comparar el comportamiento de las características del chorro diésel

correspondientes a la estrategia de inyección piloto y a la inyección simple se definieron cuatro casos a iso-tiempo, mismos que se muestran en la Figura 6.1, a través de las líneas verticales discontinuas de color negro, cabe señalar que los cuatro casos a iso-tiempo de la inyección piloto, la inyección principal y la inyección simple son equivalentes, los cuales se analizarán más a detalle en la siguiente subsección.

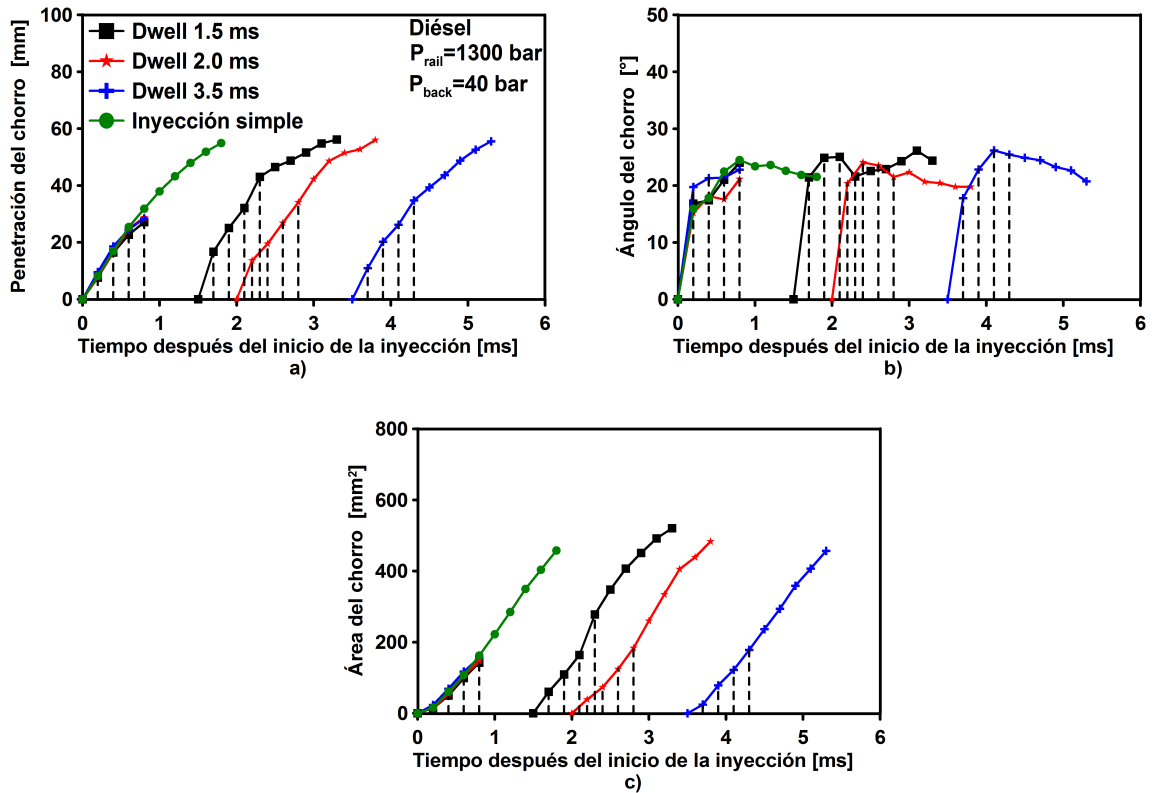


Figura 6.1: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro líquido del diésel, específicamente, a) penetración, b) ángulo, y c) área del chorro líquido de combustible.

Mientras que en la Figura 6.2, se muestra la evolución temporal de los parámetros macroscópicos (i.e. penetración, ángulo y área) del chorro líquido de la mezcla binaria diésel-biodiésel B10 bajo las mismas condiciones de operación que se emplearon para el diésel. Al igual que en el caso del diésel, se definieron los mismos cuatro casos a iso-tiempo para comparar el comportamiento de las características del chorro líquido correspondientes a la estrategia de inyección piloto y a la inyección simple, los

cuales se muestran en la Figura 6.2, a través de las líneas verticales discontinuas de color negro, cabe señalar que los cuatro casos a iso-tiempo de la inyección piloto, la inyección principal y la inyección simple son equivalentes, mismos que se analizarán en la siguiente subsección.

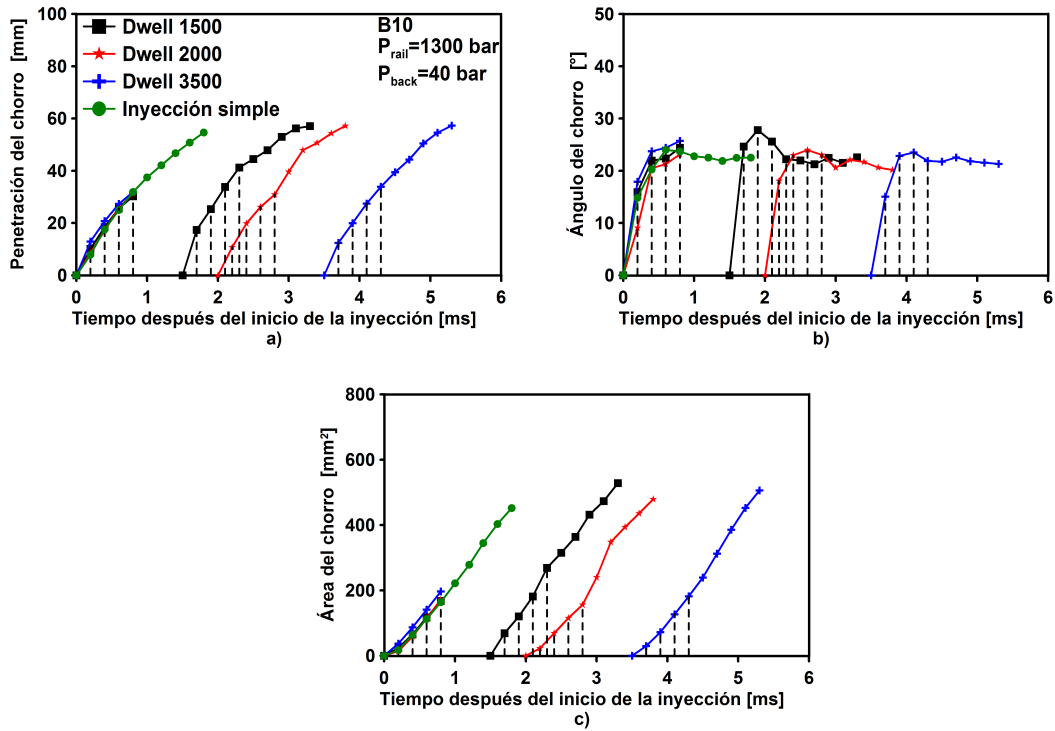


Figura 6.2: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro líquido de la mezcla binaria diésel-biodiésel B10, específicamente, a) penetración, b) ángulo, y c) área del chorro líquido de combustible.

6.2 EFECTO DE LA ESTRATEGIA DE INYECCIÓN PILOTO SOBRE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO LÍQUIDO (I.E. PENETRACIÓN, ÁNGULO, Y ÁREA) UTILIZANDO EL COMBUSTIBLE DIÉSEL DE REFERENCIA

En la Figura 6.3, se muestra el comportamiento de la penetración del chorro líquido bajo una estrategia de inyección piloto para el diésel correspondientes a los cuatro casos de iso-tiempo definidos (i.e. 0.2, 0.4, 0.6, y 0.8 ms), y a los tres niveles de dwell time, específicamente, 1.5, 2.0 y 3.5 ms. Se puede observar que para los tres niveles de dwell time la penetración de la inyección simple es similar a la de la inyección piloto para los cuatro casos de iso-tiempo, resultado que era de esperarse. Para el dwell time de 1.5 ms se observa que la inyección principal tiene un mayor valor de penetración en comparación al de la piloto y al de la inyección simple; este comportamiento puede deberse a la interacción entre estas dos inyecciones, reflejándose en un incremento del flujo de cantidad de movimiento resultado de la combinación de las velocidades del chorro líquido asociada a la inyección piloto y al de la principal, generando un efecto negativo en el proceso de mezcla [14]. Conforme aumenta el dwell time en los casos b) y c) la inyección piloto deja de tener influencia sobre la principal, debido a que cuando se inyecta la principal, la inyección piloto ya no está presente.

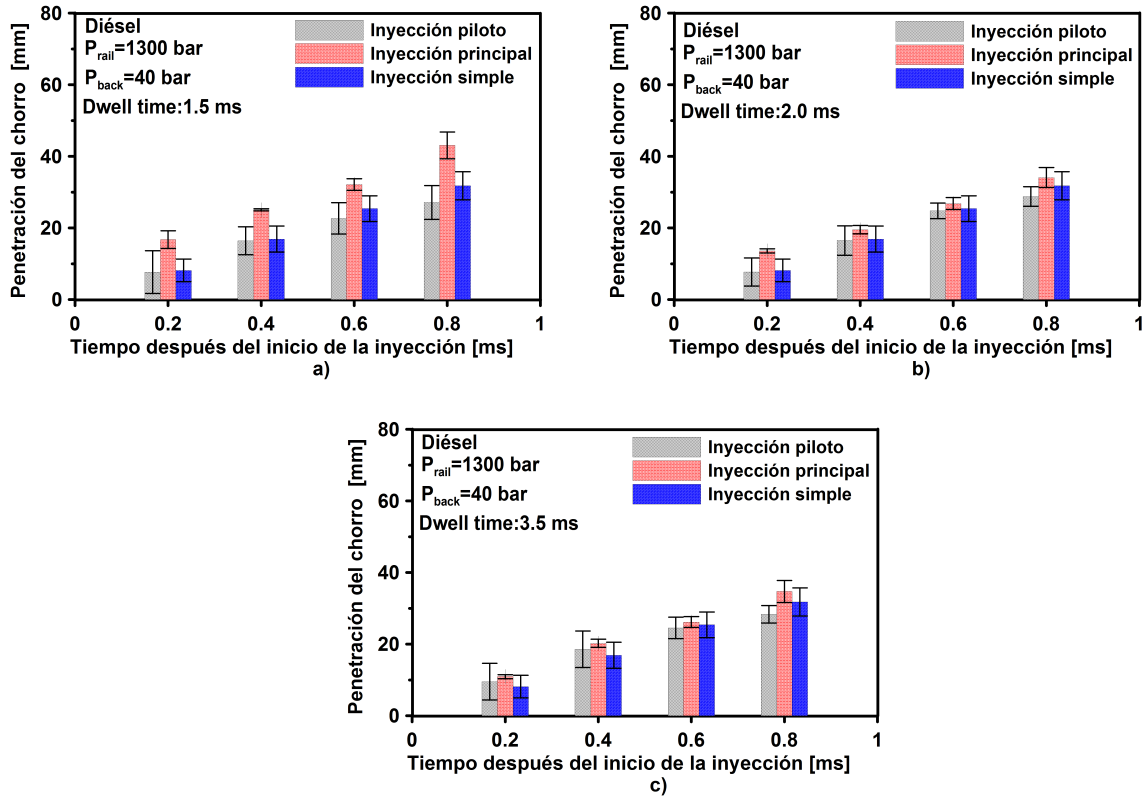


Figura 6.3: Evolución temporal de la penetración del chorro líquido correspondiente a los cuatro casos de iso-tiempo para el diésel, y diferentes dwell time, concretamente, a) 1.5 ms, b) 2.0 ms, y c) 3.5 ms.

En la Figura 6.4, se muestra el comportamiento del ángulo del chorro líquido bajo una estrategia de inyección piloto para el diésel correspondientes a los cuatro casos de iso-tiempo definidos (i.e. 0.2, 0.4, 0.6, y 0.8 ms), y a los tres niveles de dwell time, específicamente, 1.5, 2.0 y 3.5 ms. En general, para los tres niveles de dwell time se observa un mayor valor del ángulo del chorro líquido en la inyección principal en comparación a la inyección piloto y a la simple, afectando de manera positiva el proceso de mezcla; este incremento en el valor del ángulo del chorro líquido es más notorio en la Figura 6.4 a), esto se le atribuye a que cuando penetra la inyección piloto sobre el gas ambiente estable, genera una turbulencia dentro de la cámara, este incremento de turbulencia hace que el proceso de mezcla mejore [59]. En las Figuras 6.4 b) y c), se observa un mayor valor del ángulo del chorro líquido de la inyección

principal en comparación a la piloto y a la simple, debido a que el combustible de la piloto ya se ha mezclado con el aire por el incremento del dwell time, provocando una mezcla rica de gas-combustible, lo que genera una distribución más uniforme, favoreciendo el proceso de mezcla [79].

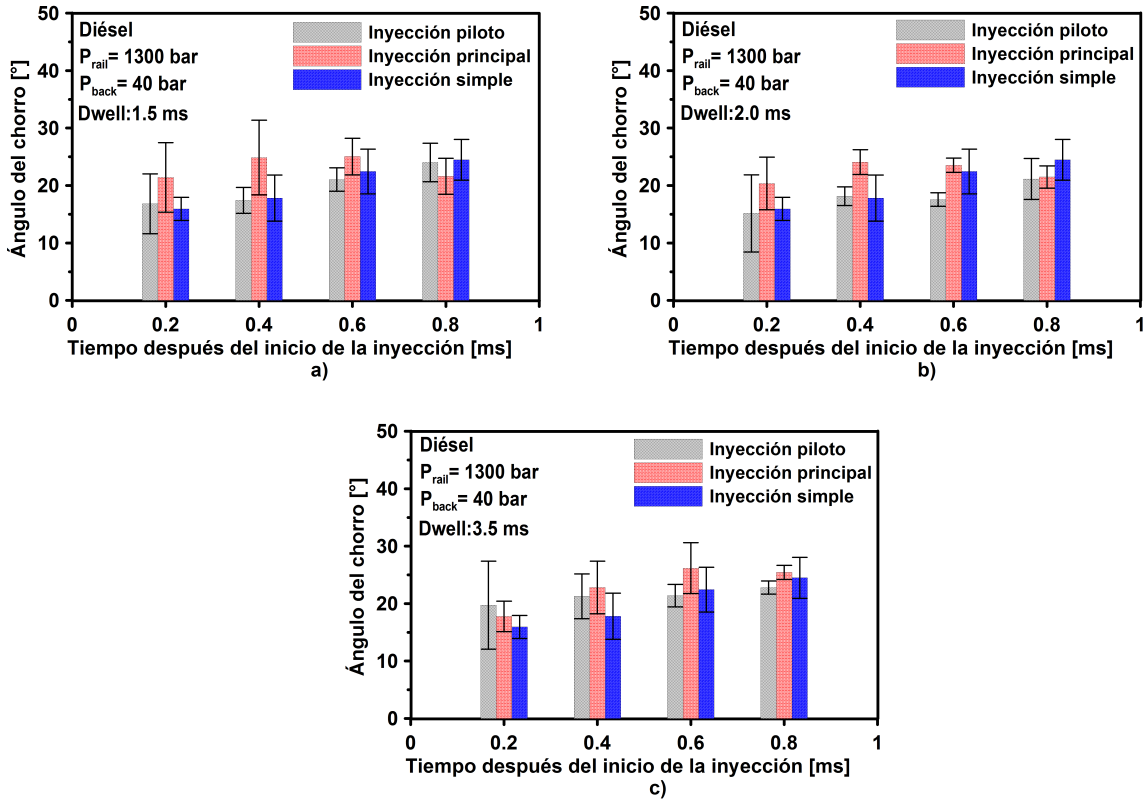


Figura 6.4: Evolución temporal del ángulo del chorro líquido correspondiente a los cuatro casos de iso-tiempo para el diésel, y diferentes dwell time, concretamente, a) 1.5 ms, b) 2.0 ms, y c) 3.5 ms.

En la Figura 6.5, se muestra el comportamiento del área del chorro líquido bajo una estrategia de inyección piloto para el diésel correspondientes a los cuatro casos de iso-tiempo definidos (i.e. 0.2, 0.4, 0.6, y 0.8 ms), y a los tres niveles de dwell time, específicamente, 1.5, 2.0 y 3.5 ms. En la Figura 6.5 a), se observa que el área del chorro líquido de la inyección principal es mayor en comparación con la piloto y la simple, afectando positivamente el proceso de mezcla; esto se debe a que al inicio de la inyección principal, todavía hay combustible líquido de la piloto, lo que conlleva

a una colisión entre ambas, este fenómeno es denominado como colisión primaria, el cual causa un aumento en el área del chorro de combustible [80]. En las Figuras 6.5 b) y c), se observa que el área del chorro líquido de la inyección principal es ligeramente superior al de la piloto y al de la simple respectivamente, esto se debe a la desaceleración de la inyección principal por el aumento del dwell time, es decir, la perturbación del gas en la cámara que deja el paso de la inyección piloto deja de influir sobre la principal [80].

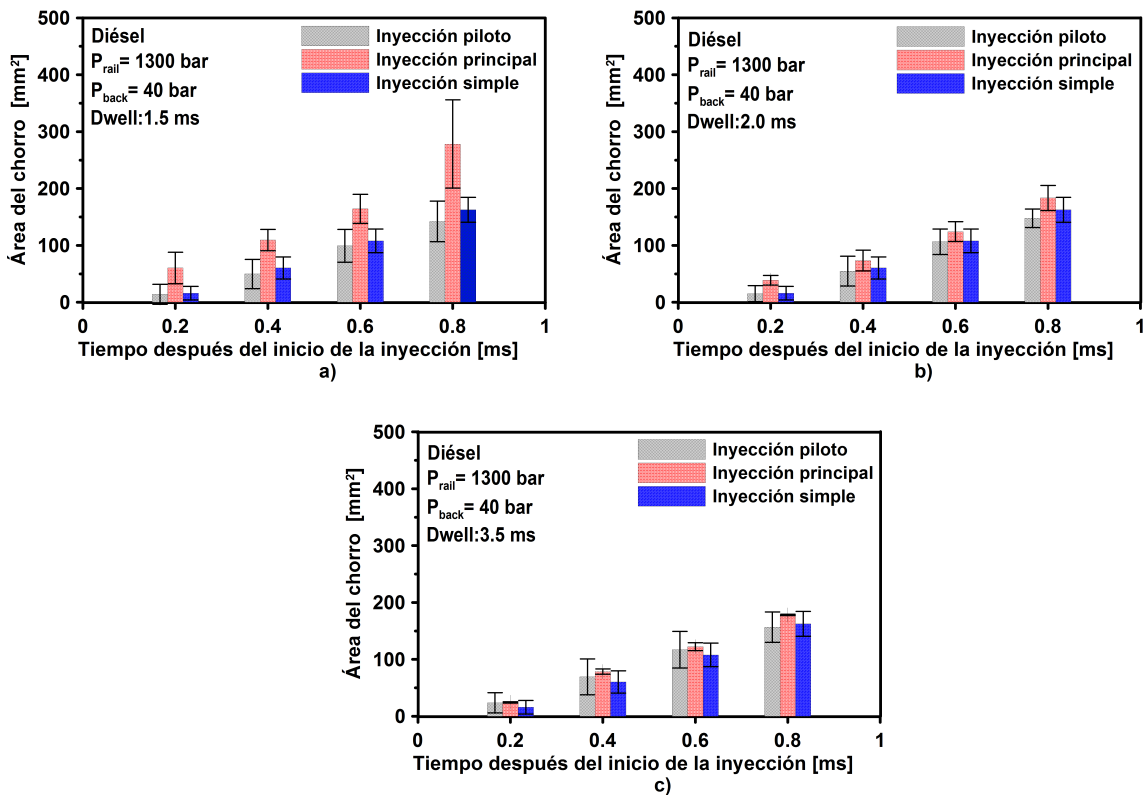


Figura 6.5: Evolución temporal del área del chorro líquido correspondiente a los cuatro casos de iso-tiempo para el diésel, y diferentes dwell time, concretamente, a) 1.5 ms, b) 2.0 ms, y c) 3.5 ms.

En la presente subsección, se observó que bajo un dwell time de 1.5 ms, la inyección piloto provoca niveles más altos de penetración del chorro líquido, afectando negativamente el proceso de mezcla, mientras que para los niveles de dwell

time de 2.0 y 3.5 ms, la inyección piloto deja de tener influencia sobre la principal, afectando de manera positiva el proceso de mezcla. Para el ángulo del chorro líquido se observó que para los tres niveles de dwell time la inyección piloto tiene una influencia positiva sobre la principal, es decir, genera mayores valores de ángulo del chorro para la principal, provocando un efecto positivo sobre el proceso de mezcla. Finalmente, para el área del chorro líquido se observó que para un dwell time de 1.5 ms, la inyección piloto influye sobre la principal provocando mayores valores de área, debido al efecto denominado colisión primaria, afectando positivamente el proceso de mezcla. En cuanto a los dwell time de 2.0 y 3.5 ms, la inyección piloto deja de influir en la principal, ya que los valores del ángulo son muy similares.

Una vez analizado el efecto de la inyección piloto sobre la principal empleando el diésel de referencia, en la siguiente subsección se estudiará este efecto variando las propiedades físicas del combustible empleando una mezcla binaria diésel-biodiésel B10.

6.3 EFECTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MEZCLA BINARIA DIÉSEL-BIODIESEL B10 BAJO UNA ESTRATEGIA DE INYECCIÓN PILOTO

En la Figura 6.6, se muestra el comportamiento de la penetración del chorro líquido bajo una estrategia de inyección piloto para la mezcla binaria diésel-biodiésel B10 correspondientes a los cuatro casos de iso-tiempo definidos (i.e. 0.2, 0.4, 0.6, y 0.8 ms), y a los tres niveles de dwell time, específicamente, 1.5, 2.0 y 3.5 ms. En la Figura 6.6 a), se puede observar que la inyección principal tiene la misma tendencia que la del diésel, es decir, el valor de la penetración de la inyección principal es mayor a la de la inyección piloto y al de la simple, bajo el efecto de un dwell time de 1.5 ms; esto se debe al incremento de flujo de cantidad de movimiento, como ya se comentó al inicio de la sección 6.2, adicional a esto la mezcla binaria B10 tiene una mayor

densidad con respecto al diésel, lo que incrementa en mayor cantidad el flujo de cantidad de movimiento [74]. En la Figura 6.6 b), se observa que conforme aumenta la evolución del chorro líquido, la inyección principal se comporta de manera similar a la piloto y a la simple, esto se debe a que el movimiento del gas provocado por la inyección piloto disminuyó como consecuencia de la disipación de la misma [81]. En la Figura 6.6 c), se observa que la inyección piloto ya no tiene ninguna influencia sobre la principal, lo cual se debe a que después de un cierto tiempo los efectos provocados en el ambiente por la inyección piloto disminuyen gradualmente.

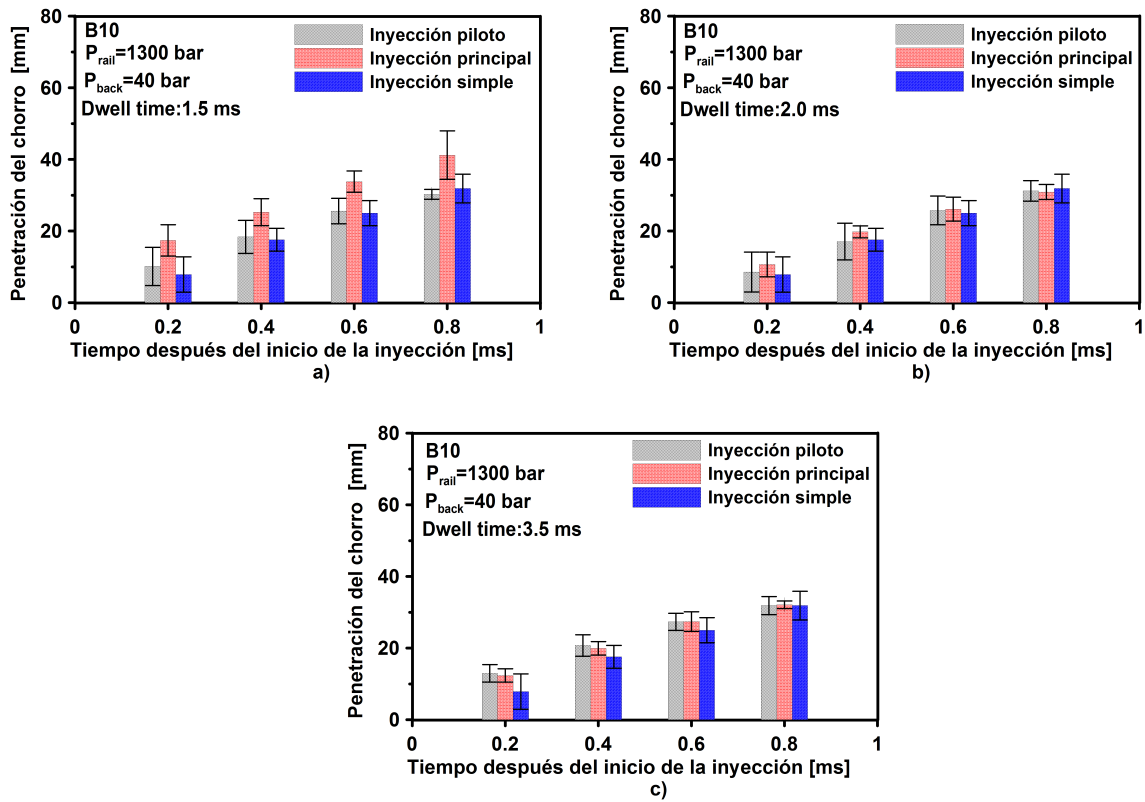


Figura 6.6: Evolución temporal de la penetración del chorro líquido correspondiente a los cuatro casos de iso-tiempo para la mezcla binaria diésel-biodiésel B10, y diferentes dwell time, concretamente, a) 1.5 ms, b) 2.0 ms, y c) 3.5 ms.

En la Figura 6.7, se muestra el comportamiento del ángulo del chorro líquido bajo una estrategia de inyección piloto para la mezcla binaria diésel-biodiésel B10 correspondientes a los cuatro casos de iso-tiempo definidos (i.e. 0.2, 0.4, 0.6, y 0.8

ms), y a los tres niveles de dwell time, concretamente, 1.5, 2.0 y 3.5 ms. En la Figura 6.7 a), se observa un comportamiento similar al del diésel, es decir, la inyección piloto favorece el proceso de mezcla, por el fenómeno ya comentado en la Figura 6.4 a), a pesar de tener una mayor viscosidad y tensión superficial en comparación al diésel. Conforme se incrementa el dwell time en las Figuras 6.7 b) y c), el ángulo del chorro líquido de la inyección principal se comporta de manera similar al de la piloto y a la simple; esto se debe a que la inyección piloto ya se atomizó y se mezcló por completo en el gas ambiente al inicio de la inyección principal, por lo tanto, al tener una mayor viscosidad y tensión superficial la mezcla binaria diésel-biodiesel B10, éstas afectan de manera negativa al proceso de atomización [76].

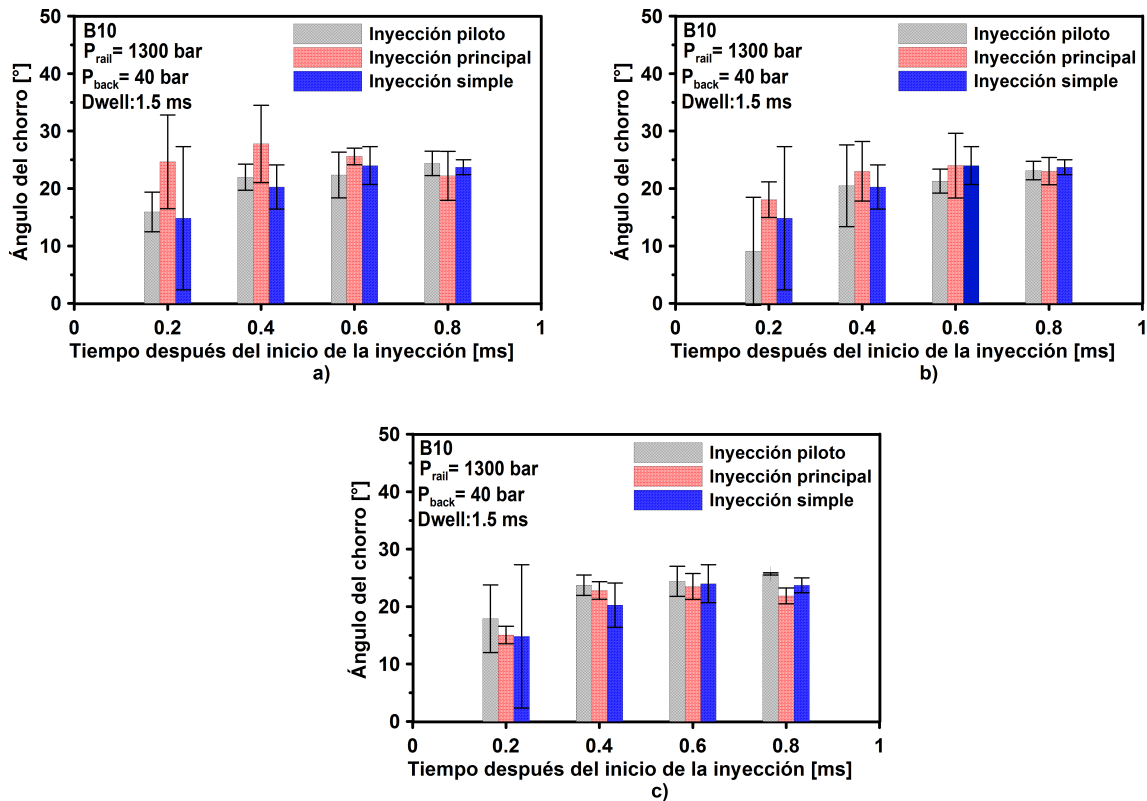


Figura 6.7: Evolución temporal del ángulo del chorro líquido correspondiente a los cuatro casos de iso-tiempo para la mezcla binaria diésel-biodiesel B10, y diferentes dwell time, concretamente, a) 1.5 ms, b) 2.0 ms, y c) 3.5 ms.

En la Figura 6.8, se muestra el comportamiento del área del chorro líquido bajo una estrategia de inyección piloto para la mezcla binaria diésel-biodiesel B10 correspondientes a los cuatro casos de iso-tiempo definidos (i.e. 0.2, 0.4, 0.6, y 0.8 ms), y a los tres niveles de dwell time, específicamente, 1.5, 2.0 y 3.5 ms. En la Figura 6.8 a), se observa el mismo efecto que en el diésel, es decir, el valor del área de la inyección principal es mayor en comparación al de la piloto y la simple, como se comentó en la Figura 6.5 a), es debido al fenómeno denominado colisión primaria, si añadimos que la mezcla binaria B10 posee una mayor densidad hace que la superficie de contacto del chorro con el gas sea mayor, favoreciendo el proceso de mezcla. En cuanto a las Figuras 6.8 b) y c), el área del chorro líquido correspondiente a la inyección principal se comporta de manera similar al de la piloto y al de la simple, esto se debe a que al inicio de la inyección principal no está presente la piloto, por lo que el chorro de la mezcla binaria diésel-biodiesel B10 al tener una mayor viscosidad y tensión superficial en comparación al diésel, afecta negativamente el proceso de atomización, y por consecuencia el proceso de mezcla [82].

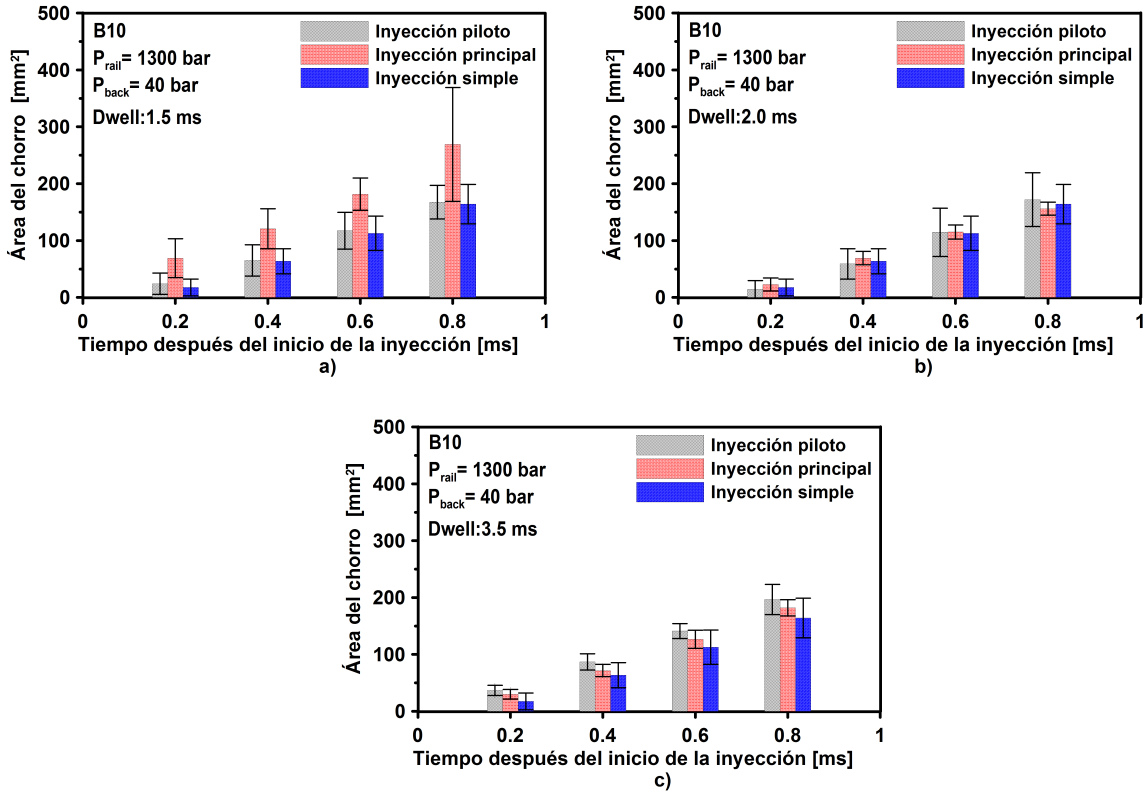


Figura 6.8: Evolución temporal del área del chorro líquido correspondiente a los cuatro casos de iso-tiempo para la mezcla binaria diésel-biodiésel B10, y diferentes dwell time, concretamente, a) 1.5 ms, b) 2.0 ms, y c) 3.5 ms.

Para poder observar la influencia de las propiedades físicas de la mezcla binaria diésel-biodiésel B10 se seleccionó el caso donde hay una mayor influencia de éstas respecto al diésel, concretamente el caso seleccionado fue el del dwell time de 2.0 ms. En la Figura 6.9 a), se puede observar para los casos a iso-tiempo de 0.2 y 0.4 ms respectivamente, la inyección piloto influye negativamente sobre la principal, tanto para el diésel como para la mezcla binaria B10, obteniendo mayores valores de penetración en ambas inyecciones principales, lo que ocasiona un efecto negativo sobre el proceso de mezcla. Conforme se estabiliza el chorro, es decir, en los casos a iso-tiempo de 0.6 y 0.8 ms, la inyección piloto continúa influyendo de manera negativa sobre la principal para el caso del diésel, pero al utilizar la mezcla binaria B10 este efecto es nulo. En la Figura 6.9 b), se observa para los casos a iso-tiempo de

0.2, 0.4, y 0.6 ms respectivamente, la inyección piloto genera un efecto positivo sobre la principal, debido a que incrementa los valores de ángulo de la inyección principal, tanto para el diésel como para la mezcla binaria B10, afectando positivamente el proceso de mezcla, pero en el caso de iso-tiempo de 0.8 ms, la inyección piloto deja de influir sobre la principal, para los dos combustibles estudiados. En la Figura 6.9 c), se observa una influencia positiva de la inyección piloto sobre la principal para los cuatro casos a iso-tiempo (0.2, 0.4, 0.6, y 0.8 ms) para el diésel, consecuencia de generar mayores valores de área para la inyección principal, mejorando el proceso de mezcla. En cambio, en los casos a iso-tiempo de 0.6 y 0.8 ms la inyección piloto deja de influir sobre la principal.

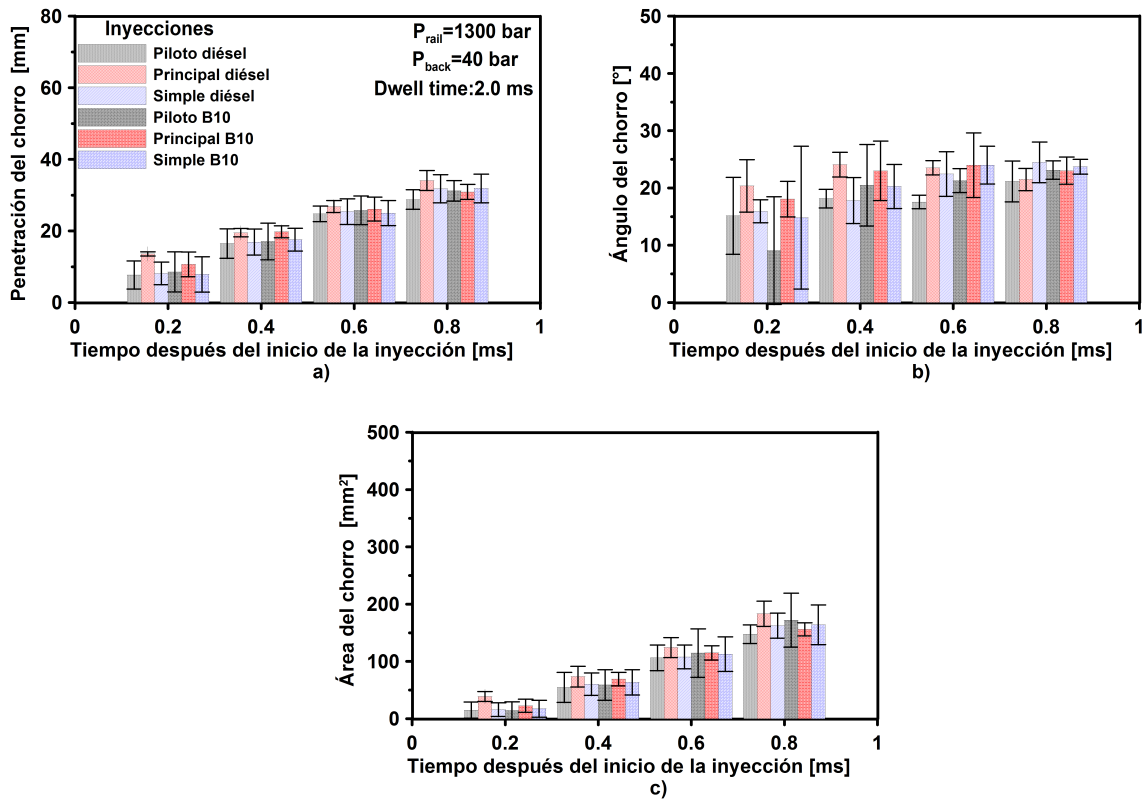


Figura 6.9: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro líquido correspondiente a los cuatro casos de iso-tiempo para el diésel y la mezcla binaria diésel-biodiésel B10, concretamente, a) penetración, b) ángulo, y c) área.

6.4 CONCLUSIONES

En el presente capítulo, se ha estudiado la influencia de la estrategia de la inyección piloto sobre los parámetros macroscópicos (i.e. penetración, ángulo, y área) del chorro diésel y además se ha estudiado la influencia de las propiedades físicas de la mezcla binaria diésel-biodiesel B10 bajo éstas mismas condiciones. A partir del cual se sintetizan las siguientes conclusiones, las cuáles algunas de ellas ya fueron descritas con anterioridad:

- El efecto de la inyección piloto sobre la principal utilizando diésel de combustible y un dwell time de 1.5 ms, afecta negativamente el proceso de mezcla, debido a que la inyección principal obtiene mayores valores de penetración por el aumento en el flujo de cantidad de movimiento por la interacción de la inyección piloto y principal. Mientras que el dwell time de 2.0 y 3.5 ms la inyección piloto deja de tener influencia sobre la principal, debido a que cuando se inyecta la principal, la inyección piloto ya no está presente.
- El ángulo del chorro líquido de la inyección principal aumentó con respecto a la piloto y a la simple para los tres dwell time (i.e. 1.5, 2.0, y 3.5 ms), afectando de manera positiva el proceso de mezcla; para el dwell time de 1.5 ms, los valores del ángulo del chorro líquido son más notorios debido a que cuando se inyecta la principal genera una turbulencia dentro de la cámara que favorece el proceso de mezcla. En los dwell time de 2.0 y 3.5 ms, se observó que, al inicio de la inyección principal, la inyección piloto ya estaba mezclada con el gas de la cámara, lo cual genera una mezcla rica de gas-combustible que provoca una distribución más uniforme del chorro.
- La inyección piloto influye de manera positiva sobre la principal utilizando un dwell time de 1.5 ms, debido a que aumenta los valores de área de la principal, esto se debe a la colisión entre ambas inyecciones, este fenómeno es denominado “colisión primaria”, el cual aumenta el área por la pobre dispersión de las gotas

de combustible en el centro del chorro. Para los dwell time de 2.0 y 3.5 ms la inyección piloto deja de influir en la principal debido a que la perturbación del gas que deja el paso de la inyección piloto ya no causa efecto sobre la principal.

- La inyección piloto influye de manera negativa sobre la principal para la mezcla binaria B10 bajo un dwell time de 1.5 ms, afectando negativamente el proceso de mezcla, generando mayores valores de penetración en la inyección principal, debido al aumento de flujo de cantidad de movimiento por la interacción de las dos inyecciones, aunado al mayor valor de densidad que posee la mezcla binaria B10. En tanto el dwell time de 2.0 y 3.5 ms, la inyección piloto no afecta a la inyección principal, por lo que se puede concluir que la mezcla binaria B10 bajo estos dos dwell time tienen el mismo comportamiento que el diésel.
- Para un dwell time de 1.5 ms, la inyección piloto influye sobre la principal aumentando los valores de ángulo del chorro, lo que conlleva a un efecto positivo del proceso de mezcla, a pesar de tener una mayor viscosidad en comparación al diésel. Mientras que para los dwell time de 2.0 y 3.5 ms, la inyección piloto deja de tener influencia sobre la principal, debido a que al inicio de la principal, la inyección piloto ya esta mezclada con el gas de la cámara; al tener una mayor viscosidad y tensión superficial la mezcla binaria diésel-biodiesel B10, éstas afectan de manera negativa al proceso de atomización.
- El área del chorro de la inyección principal se ve afectada positivamente por la piloto, bajo un dwell time de 1.5 ms, lo cual afecta de buena, manera el proceso de mezcla, mientras que para un dwell de 2.0 ms, la inyección principal se comporta de manera similar a la piloto. Y para un dwell time de 3.5 ms, se observa que la inyección piloto afecta a la principal, disminuyendo los valores de área de ésta última, afectando de manera negativa el proceso de mezcla.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente capítulo se enumeraran las conclusiones formuladas con base en los resultados obtenidos de los Capítulos “Influencia de las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiesel sobre los parámetros macroscópicos del chorro líquido de combustible”, y “Efectos de las propiedades físicas del combustible sobre los parámetros macroscópicos del chorro líquido de combustible bajo una estrategia de inyección piloto”, además los trabajos futuros propuestos para la ampliación del presente estudio.

7.1 CONCLUSIONES

En la presente investigación se estudiaron los efectos de las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiesel sobre los parámetros macroscópicos del chorro de combustible líquido (i.e. penetración, ángulo y área del chorro), bajo una estrategia de inyección simple, para ello, se seleccionaron tres mezclas binarias (B05, B10, B20), y el diésel como combustible de referencia. Los experimentos se realizaron variando tres niveles de P_{rail} 500, 800 y 1300 bar, y tres niveles de P_{back} 40, 50 y 60 bar. También se estudió la influencia de la inyección piloto sobre los parámetros macroscópicos del chorro de combustible líquido (i.e. penetración, ángulo y área del chorro) de la inyección principal, utilizando el diésel de referencia; para ello se seleccionó un caso de estudio que se empleó en la inyección simple, el cual fue a un nivel de P_{rail} de 1300 bar, un nivel de P_{back} de 40 bar, bajo tres diferentes niveles de dwell time, 1.5, 2.0, y 3.5 ms respectivamente. Por último, se estudió la influencia de las propiedades físicas de la mezcla binaria diésel-biodiesel B10 bajo una estrategia de inyección piloto bajo las mismas condiciones que el diésel. Seguidamente, se sintetizan las principales conclusiones que se han alcanzado en el presente trabajo.

- El biodiesel representa una gran oportunidad debido a que es un combustible limpio que se puede producir a partir de productos naturales como plantas y semillas, así como también de grasas animales, vegetales y aceites residuales, además se puede mezclar en cualquier proporción con el diésel. El aceite residual es una buena opción para producir biodiesel debido a que su costo de su producción es bajo, ya que ésta representa el 80 % de su costo final, además de la buena disposición final que se le da a este residuo.
- El aumento de proporción de biodiesel en las mezclas binarias diésel-biodiesel aumenta sus propiedades físicas, específicamente, la densidad, viscosidad y tensión superficial, por tal motivo en el presente estudio las mezclas que se utilizaron fueron la mezcla binaria B05, B10 y B20, debido a que una mayor

proporción de biodiesel puede llegar a dañar los componentes del sistema de inyección diésel common-rail, además que algunas de estas mezclas son las que actualmente se usan en los motores Diesel.

- La penetración del chorro líquido se ve afectado por la densidad, a mayor densidad mayores valores de penetración del chorro líquido, debido a que contiene mayor masa de combustible por unidad de volumen, lo que genera una mayor presión sobre el gas atmosférico que lo rodea.
- La viscosidad y la tensión superficial afectan negativamente el ángulo y el área del chorro líquido, debido a que estas dos propiedades físicas dificultan el proceso de atomización del combustible, es decir, a la desintegración de éste en pequeñas gotas, a mayores valores de viscosidad y tensión superficial menores son los valores de ángulo y área del chorro líquido.
- Conforme aumenta la presión de inyección, se incrementan los valores de penetración del combustible, específicamente en este estudio, el incremento de la penetración es del orden del 30 % para el rango estudiado entre 500 y 1300 bar, a consecuencia de que se inyecta más masa de combustible, lo que genera una mayor presión sobre el gas que lo rodea.
- Cuando aumenta el nivel de P_{back} en la cámara de volumen constante, disminuyen los valores de penetración del chorro líquido, para el presente estudio, el valor de la penetración disminuyó en el orden del 8.5 %, para el rango estudiado entre 40 y 60 bar, debido a que existe una mayor oposición al movimiento del chorro líquido de combustible.
- La P_{rail} y la P_{back} son condiciones de operación que influyen en los parámetros macroscópicos (i.e. penetración, ángulo y área) del chorro líquido, conforme éstos aumentan, se observa que las propiedades físicas van dejando de tener un efecto significativo sobre los parámetros macroscópicos.
- La inyección piloto provoca mayores valores de penetración en la inyección principal bajo un dwell time de 1.5 ms, tanto para el diésel como para la

mezcla binaria B10, este incremento de la penetración es del orden del 30 % con respecto a la inyección simple de cada combustible, afectando de manera negativa el proceso de mezcla, debido al aumento en el flujo de cantidad de movimiento por la interacción de la inyección piloto y principal.

- El ángulo del chorro líquido de la inyección principal aumentó en el orden del 15 % con respecto a la piloto y a la simple para los tres dwell time (i.e. 1.5, 2.0, y 3.5 ms), esto para el diésel de referencia, debido a que cuando se inyecta la piloto genera una turbulencia dentro de la cámara que favorece el proceso de mezcla. Mientras que para la mezcla binaria B10, la inyección piloto provocó un mayor ángulo del chorro de la inyección principal, favoreciendo el proceso de mezcla de esta última bajo el dwell time de 1.5 ms, en los dwell time de 2.0 y 3.5 ms ya deja de tener influencia debido a que la inyección piloto ya está mezclada con el gas, al inicio de la inyección principal.
- El área de la inyección principal es mayor respecto a la de la piloto bajo un dwell time de 1.5 ms, tanto para el diésel como para la mezcla binaria B10, debido al efecto denominado “colisión primaria”, el cual aumenta el área por la pobre dispersión de las gotas de combustible en el centro del chorro.
- Los parámetros macroscópicos (i.e. penetración, ángulo y área) del chorro líquido de la mezcla binaria B10 son similares a los del diésel, bajo un dwell time de 2 ms, esto es favorable para el proceso de mezcla, ya que la finalidad de la inyección piloto es aumentar la presión y la temperatura dentro de la cámara de combustión en un motor Diesel, es decir, bajo las condiciones de operación de un nivel P_{rail} de 1300 bar, y un nivel de P_{back} de 60 bar.

7.2 TRABAJOS FUTUROS

Con el propósito de continuar y complementar la presente investigación, se proponen los siguientes trabajos futuros:

- Como se destacó en la Tabla 5.4, en la presente investigación se empleó un inyector diésel de tipo solenoide, ahora teniendo en cuenta que el tiempo de apertura y cierre de un inyector piezoeléctrico es menor en comparación al del solenoide, se propone estudiar los efectos de las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiesel sobre las características del chorro de combustible líquido, empleando un inyector piezoeléctrico.
- Estudiar el efecto de las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiesel sobre el levantamiento de la aguja, y el comportamiento del flujo interno a través de la tobera diésel, mediante la medición de la tasa de inyección, y la relación de estos dos fenómenos sobre el proceso de mezcla.
- En el presente estudio se caracterizó el proceso de mezcla bajo inyección simple y la estrategia de inyección piloto, por lo cual, el presente estudio puede ser ampliado analizando los efectos de las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiesel sobre las características del chorro líquido, bajo la estrategia de post-inyección e inyección dividida.
- Caracterizar las emisiones contaminantes utilizando las mezclas binarias diésel-biodiesel objeto de estudio en la presente investigación, con la finalidad de tener más criterios para la implementación de estas mezclas en los motores Diesel actuales.
- La caracterización microscópica del chorro líquido, es decir, la medición de la velocidad y el diámetro de las gotas de combustible, es de interés para profundizar en el conocimiento del proceso de mezcla, por tal motivo, el presente estudio se puede ampliar estudiando la velocidad de las gotas de combustible

mediante la técnica óptica de anemometría de láser Doppler (*Laser Doppler Anemometry*, LDA), y el diámetro de las gotas de combustible mediante la técnica óptica de anemometría de fase Doppler (*Phase Doppler Anemometry*, PDA).

REFERENCIAS

- [1] Silvia Aracely Artiga Morales, Ana Gloria Menjívar Martínez, and Krissia Guadalupe Aquino Córdova. *Causas y efectos del cambio climático generados por el sistema de producción industrial actual: los esfuerzos de la comunidad internacional para contrarrestarlo y los compromisos adquiridos por los países desarrollados como los principales contaminadores, periodo 1990 2007*. PhD thesis, Universidad de El Salvador, 2010.
- [2] SENER. Balance nacional de energía, 2016.
- [3] Cenk Sayin and Mustafa Canakci. Effects of injection timing on the engine performance and exhaust emissions of a dual-fuel diesel engine. 50:203–213, 01 2009.
- [4] INECC. Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, 2015.
- [5] ITDP. La importancia de reducción del uso del automóvil en México, 2012.
- [6] ICCT. Regulaciones sobre emisiones de vehículos pesados en México, 2014.
- [7] Ayhan Demirbas. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy conversion and management*, 49(8):2106–2116, 2008.
- [8] IM Atadashi, MK Aroua, and A Abdul Aziz. High quality biodiesel and its diesel engine application: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7):1999–2008, 2010.

- [9] Miguel de Castro Vicente. El motor diesel en el automóvil. *EDICIONES CEAC, S.A*, 1987.
- [10] Cherng-Yuan Lin. Effects of biodiesel blend on marine fuel characteristics for marine vessels. *Energies*, 6(9):4945–4955, 2013.
- [11] Mar Viana, Pieter Hammingh, Augustin Colette, Xavier Querol, Bart Degraeuwe, Ina de Vlieger, and John van Aardenne. Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in europe. *Atmospheric Environment*, 90:96–105, 2014.
- [12] E Sadeghinezhad, SN Kazi, A Badarudin, CS Oon, MNM Zubir, and Mohammad Mehrali. A comprehensive review of bio-diesel as alternative fuel for compression ignition engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28:410–424, 2013.
- [13] José M Desantes and Francisco Payri GONZÁLEZ. Motores de combustión interna alternativos. *Universidad Politécnica de Valencia*, 2011.
- [14] Su Han Park, Hyung Jun Kim, and Chang Sik Lee. Effect of multiple injection strategies on combustion and emission characteristics in a diesel engine. *Energy & Fuels*, 30(2):810–818, 2016.
- [15] Myung Yoon Kim, Seung Hyun Yoon, Ki Hyoung Park, and Chang Sik Lee. Effect of multiple injection strategies on the emission characteristics of dimethyl ether (dme)-fueled compression ignition engine. *Energy & Fuels*, 21(5):2673–2681, 2007.
- [16] SENER. Prospectiva de petróleo crudo y petrolíferos 2013-2027, 2013.
- [17] Mustafa Balat and Havva Balat. A critical review of bio-diesel as a vehicular fuel. *Energy conversion and management*, 49(10):2727–2741, 2008.
- [18] Fangrui Ma and Milford A Hanna. Biodiesel production: a review. *Bioresource technology*, 70(1):1–15, 1999.

- [19] Nancy E López Ramírez, Itzel De los santos Reyes, Artemio de Jesus Jiménez Díaz, and Rodolfo Palacios-Silva. Biodiesel.
- [20] A Avinash, D Subramaniam, and A Murugesan. Bio-diesel—a global scenario. *Renewable and sustainable energy reviews*, 29:517–527, 2014.
- [21] SENER. Prospectiva de energías renovables 2016 - 2030, 2016.
- [22] Seung Hyun Yoon, Hyun Kyu Suh, and Chang Sik Lee. Effect of spray and egr rate on the combustion and emission characteristics of biodiesel fuel in a compression ignition engine. *Energy & Fuels*, 23(3):1486–1493, 2009.
- [23] M Suresh, CP Jawahar, and Arun Richard. A review on biodiesel production, combustion, performance, and emission characteristics of non-edible oils in variable compression ratio diesel engine using biodiesel and its blends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92:38–49, 2018.
- [24] Ayhan Demirbaş. Biodiesel from vegetable oils via transesterification in supercritical methanol. *Energy conversion and management*, 43(17):2349–2356, 2002.
- [25] Ayhan Demirbas. Biodiesel production via non-catalytic scf method and biodiesel fuel characteristics. *Energy conversion and Management*, 47(15-16):2271–2282, 2006.
- [26] Chandra B Prakash. *A critical review of biodiesel as a transportation fuel in Canada*. 1998.
- [27] Mustafa Balat. Current alternative engine fuels. *Energy Sources*, 27(6):569–577, 2005.
- [28] Ingrid Lozada, Jorge Islas, and Genice Grande. Environmental and economic feasibility of palm oil biodiesel in the mexican transportation sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1):486–492, 2010.

- [29] Orkun Özener, Levent Yüksek, Alp Tekin Ergenç, and Muammer Özkan. Effects of soybean biodiesel on a di diesel engine performance, emission and combustion characteristics. *Fuel*, 115:875–883, 2014.
- [30] Xiangang Wang, Zuohua Huang, Olawole Abiola Kutu, Wu Zhang, and Keiya Nishida. Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure. *International journal of heat and fluid flow*, 31(4):659–666, 2010.
- [31] S Som, DE Longman, AI Ramírez, and SK Aggarwal. A comparison of injector flow and spray characteristics of biodiesel with petrodiesel. *Fuel*, 89(12):4014–4024, 2010.
- [32] Hongzhan Xie, Lanbo Song, Yizhi Xie, Dong Pi, Chunyu Shao, and Qizhao Lin. An experimental study on the macroscopic spray characteristics of biodiesel and diesel in a constant volume chamber. *Energies*, 8(6):5952–5972, 2015.
- [33] Balaji Mohan, Wenming Yang, Kun Lin Tay, and Wenbin Yu. Experimental study of spray characteristics of biodiesel derived from waste cooking oil. *Energy conversion and management*, 88:622–632, 2014.
- [34] Ahmad Mohammadshirazi, Asadolah Akram, Shahin Rafiee, and Elnaz Bagheri Kalhor. Energy and cost analyses of biodiesel production from waste cooking oil. *Renewable and sustainable energy reviews*, 33:44–49, 2014.
- [35] Ayhan Demirbas. Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy conversion and management*, 50(1):14–34, 2009.
- [36] Jorge Martínez López. *Estudio computacional de la influencia del levantamiento de aguja sobre el flujo interno y el fenómeno de la cavitación en toberas de inyección diésel*. PhD thesis, 2013.
- [37] FJ Salvador. Estudio teórico experimental de la influencia de la geometría de toberas de inyección diesel sobre las características del flujo interno y del chorro. *Valencia: Universidad Politécnica*, 2003.

- [38] R Payri, H Climent, FJ Salvador, and AG Favennec. Diesel injection system modelling. methodology and application for a first-generation common rail system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 218(1):81–91, 2004.
- [39] Raul Payri, Bernardo Tormos, Francisco Javier Salvador, and Alejandro Hernan Plazas. Using one-dimensional modelling codes to analyse the influence of diesel nozzle geometry on injection rate characteristics. *International Journal of vehicle design*, 38(1):58–78, 2005.
- [40] Oscar Alejandro de La Garza de León et al. *Estudio de los efectos de la cavitación en toberas de inyección diesel sobre el proceso de inyección y el de formación de hollín*. PhD thesis, Universitat Politècnica de València, 2012.
- [41] Glenn R Bower and David E Foster. A comparison of the bosch and zudch rate of injection meters. Technical report, WISCONSIN UNIV-MADISON ENGINE RESEARCH CENTER, 1991.
- [42] Alejandro Hernán Plazas. *Modelado unidimensional de inyectoros common-rail diesel*. PhD thesis, PhD thesis, ETS Ingenieros Industriales. Universidad Politecnica de Valencia, Valencia (Spain), 2005.
- [43] ZAPATA PEMBERTHY and LUIS DANIEL. *Caracterización de los procesos de Inyección-Combustión Diesel mediante visualización y procesado digital de imágenes*. PhD thesis, 2010.
- [44] Arthur H Lefebvre and Vincent G McDonell. *Atomization and sprays*. CRC press, 2017.
- [45] Hiroyuki Hiroyasu. Spray breakup mechanism from the hole-type nozzle and its applications. *Atomization and Sprays*, 10(3-5), 2000.
- [46] Jeffrey D Naber and Dennis L Siebers. Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays. 1996.

- [47] Rolf D Reitz and FB Bracco. On the dependence of spray angle and other spray parameters on nozzle design and operating conditions. Technical report, SAE technical paper, 1979.
- [48] RD Reitz and FV Bracco. Mechanism of atomization of a liquid jet. *The physics of Fluids*, 25(10):1730–1742, 1982.
- [49] F Ruiz. A few useful relations for cavitating orifices. *ICLASS-91, S*, pages 595–602, 1991.
- [50] Francisco Ruiz and L He. Turbulence inside a cavitating injector orifice: a different animal. *Proceedings of ILASS-America, Davis, CA, US*, 1998.
- [51] JV Pastor. *Estudio experimental del movimiento del aire en un motor Diesel de inyección directa mediante Anemometria Láser Doppler*. PhD thesis, Tesis Doctoral, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos-Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1996. Aparece en: Cap. 2, 1996.
- [52] Dennis L Siebers. Liquid-phase fuel penetration in diesel sprays. Technical report, SAE technical paper, 1998.
- [53] N Hay and PL Jones. Comparison of the various correlations for spray penetration. Technical report, SAE Technical Paper, 1972.
- [54] Yutaro Wakuri, Masaru Fujii, Tatsuo Amitani, and Reijiro Tsuneya. Studies on the penetration of fuel spray in a diesel engine. *Bulletin of JSME*, 3(9):123–130, 1960.
- [55] JC Dent. A basis for the comparison of various experimental methods for studying spray penetration. *SAE Transactions*, pages 1881–1884, 1971.
- [56] William E Ranz. Some experiments on orifice sprays. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 36(4):175–181, 1958.
- [57] Hiro Hiroyasu and Masataka Arai. Structures of fuel sprays in diesel engines. *SAE transactions*, pages 1050–1061, 1990.

- [58] E Delacourt, B Desmet, and B Besson. Characterisation of very high pressure diesel sprays using digital imaging techniques. *Fuel*, 84(7-8):859–867, 2005.
- [59] Antonio Garcia Martinez. *Estudio de los efectos de la post inyección sobre el proceso de combustión y la formación de hollín en motores diesel*. PhD thesis, 2009.
- [60] Omar Torres Garza. Efecto de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla en un motor diésel. Master’s thesis, Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León., 2016.
- [61] Li Jun, Yoshio Sato, and Akira Noda. An experimental study on dme spray characteristics and evaporation processes in a high pressure chamber. Technical report, SAE Technical Paper, 2001.
- [62] Guillermo Rubio-Gómez, S Martínez-Martínez, Luis F Rua-Mojica, Pablo Gómez-Gordo, and Oscar A de la Garza. Automatic macroscopic characterization of diesel sprays by means of a new image processing algorithm. *Measurement Science and Technology*, 29(5):055406, 2018.
- [63] D ASTM. Standard test method for distillation of petroleum products at atmospheric pressure. *American Society for Testing Materials, West Conshohocken PA, USA*, 1997.
- [64] Sydney Young, Ernest Briggs, Thomas Howard Butler, Thomas H Durrans, Francis Robert Henley, James Kewley, and Joseph Reilly. Distillation principles and processes. 1922.
- [65] Karen Schou Pedersen, Aage Fredenslund, and Per Thomassen. *Properties of oils and natural gases*, volume 5. Gulf Pub Co, 1989.
- [66] Mohammad R Riazi and Taher A Al-Sahhaf. Physical properties of heavy petroleum fractions and crude oils. *Fluid Phase Equilibria*, 117(1-2):217–224, 1996.

- [67] ASTM Standard et al. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate. In *Annual Book of ASTM (American Society of Testing Material) Standards, 04.02*. ASTM International West Conshohocken, PA, 2012.
- [68] Dimitrios Tziourtzioumis and Anastassios Stamatelos. Experimental investigation of the effect of biodiesel blends on a di diesel engine’s injection and combustion. *Energies*, 10(7):970, 2017.
- [69] José M Desantes, Raúl Payri, Antonio Garcia, and Julien Manin. Experimental study of biodiesel blends’ effects on diesel injection processes. *Energy & Fuels*, 23(6):3227–3235, 2009.
- [70] Chengjun Du, Sven Andersson, and Mats Andersson. The effect of cavitation on the estimation of fuel injection rates based on momentum flux measurements. *Fuel*, 238:354–362, 2019.
- [71] L Corral-Gómez, G Rubio-Gómez, S Martínez-Martínez, and FA Sánchez-Cruz. Effect of diesel-biodiesel-ethanol blends on the spray macroscopic parameters in a common-rail diesel injection system. *Fuel*, 241:876–883, 2019.
- [72] Pin-Chia Chen, Wei-Cheng Wang, William L Roberts, and Tiegang Fang. Spray and atomization of diesel fuel and its alternatives from a single-hole injector using a common rail fuel injection system. *Fuel*, 103:850–861, 2013.
- [73] Robert Bosch. *Sistemas de inyección diesel por acumulador Common Rail*. Reverté, 2005.
- [74] Wei Du, Juejue Lou, Yu Yan, Wenhua Bao, and Fushui Liu. Effects of injection pressure on diesel sprays in constant injection mass condition. *Applied Thermal Engineering*, 121:234–241, 2017.
- [75] Su Han Park, Hyung Jun Kim, Hyun Kyu Suh, and Chang Sik Lee. A study on the fuel injection and atomization characteristics of soybean oil methyl ester (sme). *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30(1):108–116, 2009.

- [76] Breda Kegl, Marko Kegl, and Stanislav Pehan. Effects of biodiesel usage on fuel spray characteristics. In *Green Diesel Engines*, pages 153–177. Springer, 2013.
- [77] Chao He, Yunshan Ge, Jianwei Tan, and Xiukun Han. Spray properties of alternative fuels: A comparative analysis of biodiesel and diesel. *International journal of energy research*, 32(14):1329–1338, 2008.
- [78] Sergio Borrego Alvarez. *Estudio de los efectos de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla en un motor diesel*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2018.
- [79] Yuyin Zhang, Keiya Nishida, and Takuo Yoshizaki. Characterization of droplets and vapor concentration distributions in split-injection diesel sprays by processing uv and visible images. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 46(1):100–108, 2003.
- [80] Ziman Wang, Hongming Xu, Changzhao Jiang, and Mirosław L Wyszynski. Experimental study on microscopic and macroscopic characteristics of diesel spray with split injection. *Fuel*, 174:140–152, 2016.
- [81] PV Farrell, CT Chang, and TF Su. High pressure multiple injection spray characteristics. *SAE transactions*, pages 1271–1280, 1996.
- [82] Flor de Lis Larami Corral Gomez. *Estudio del efecto de las propiedades de mezclas ternarias de combustibles en el proceso de mezcla en MEC*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2018.

APÉNDICE A

PUESTA EN OPERACIÓN DE UN AMPLIFICADOR DE POTENCIA PARA CONTROLAR INYECTORES DIÉSEL DE TIPO SOLENOIDE (GENOTEC)

En el presente anexo se describe a detalle la puesta en operación de un amplificador de potencia para controlar inyectores diésel de tipo solenoide (GENOTEC), que se utiliza para estudiar las diferentes estrategias de inyección múltiple. Para ello el presente anexo se divide en seis secciones. En la sección “objetivo”, se describe la finalidad del presente anexo, en la sección “Introducción”, se muestra una descripción del equipo GENOTEC, en la sección “Descripción del tablero GENOTEC”, se detalla la finalidad de cada puerto de entrada o salida presentes en la parte frontal y posterior del equipo GENOTEC, en la sección “Configuración y operación del programa”, se detalla cada una de las ventanas de la interfaz del software del GENOTEC, en la sección “Ejemplo de configuración del software”, se muestra un ejemplo de la configuración que se debe llevar a cabo para utilizar una estrategia de inyección múltiple, y finalmente, en la sección “conclusiones”, se muestran las conclusiones de la presente actividad.

A.1 OBJETIVO

El objetivo principal de esta actividad es la de poner en operación, y proporcionar un manual de usuario para operar el amplificador de potencia para controlar inyectores diésel de tipo solenoide (GENOTEC), y así poder estudiar las diferentes estrategias de inyección múltiple.

A.2 INTRODUCCIÓN

En la Figura A.1, se muestra una imagen del equipo GENOTEC, que se utiliza para el control de inyectores diésel solenoides, el cual está compuesto por dos componentes: una unidad electrónica (Solenoid Injector Power Amplifier V2), y un software especializado, el cual comunica dicha unidad electrónica con la computadora. Este equipo se utiliza en conjunto con un generador de pulsos, éste generará una señal TTL que se utilizará para el puerto trigger/gate. Mediante este conjunto de equipos se podrán controlar aspectos o parámetros tales como el pulso de energización del inyector, el voltaje de apertura, el voltaje de mantenida y la frecuencia de inyección.

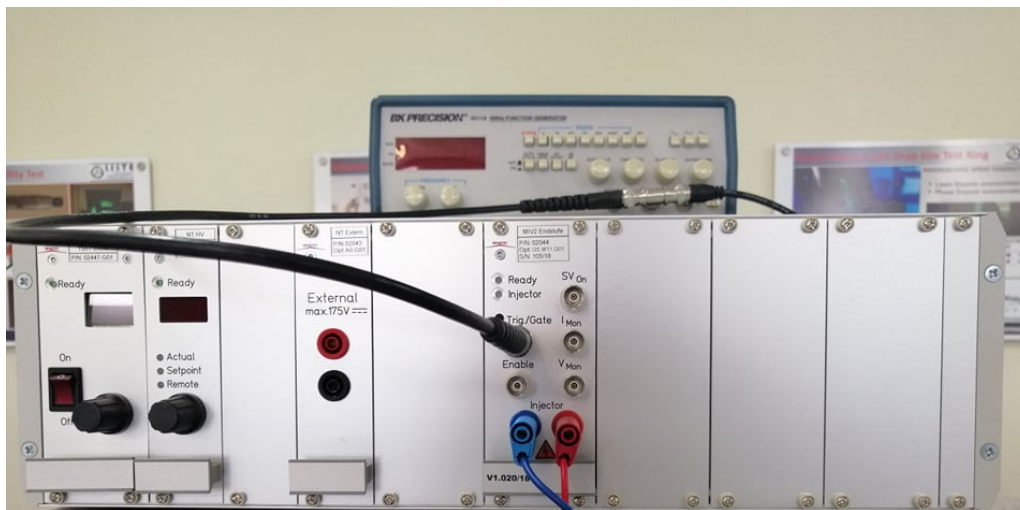


Figura A.1: Amplificador de potencia para controlar inyectores diésel de tipo solenoide (GENOTEC).

A.3 DESCRIPCIÓN DEL TABLERO GENOTEC

Para realizar una comunicación exitosa entre el equipo GENOTEC y el inyector es necesario conocer los puertos necesarios para esta interacción. Se puede observar en la Figura A.2, que en la parte posterior se encuentra el puerto para la entrada de la alimentación del equipo. En este lado también se encuentran puertos para la conexión USB, Ethernet y una entrada VGA. De estos puertos se seleccionó una conexión USB entre el equipo GENOTEC y la PC.



Figura A.2: Parte posterior del equipo GENOTEC.

En la Figura A.3, se muestra la primera sección de la parte frontal del GENOTEC, donde se localiza el switch de encendido, junto con un indicador y un LED indicador.



Figura A.3: Primera sección

En la segunda sección de la parte frontal, se puede encontrar un LED indicador (Ready), y un conjunto de tres LEDs indicadores: 1) actual, 2) setpoint, y 3) remote, para la conexión establecida, estos indicadores se pueden observar en la Figura A.4



Figura A.4: Segunda sección

En la Figura A.5, se encuentra la tercera sección de la parte frontal, en la que se encuentran las entradas para una fuente externa de corriente directa con un máximo de 175 Volts.



Figura A.5: Tercera sección

En la Figura A.6, se puede observar la cuarta sección de la parte frontal del equipo GENOTEC. A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de los puertos presentes en ésta cuarta sección.



Figura A.6: Cuarta sección

- **Trigger/Gate:** Este puerto recibe la señal TTL que emite el generador de pulsos, a su vez se hace una conexión con un osciloscopio para revisar el estado de la señal, y así de esta manera averiguar si existe alguna contaminación en dicha señal que pueda afectar a la experimentación. La señal TTL indica al equipo GENOTECH, cada cuando debe iniciar el evento de inyección, en caso de no tener esta señal TTL el inyector no se logrará energizar.

En la Figura A.7, obtenida mediante el osciloscopio, se puede observar el pulso TTL que llega al puerto de Trigger/Gate mediante el generador de pulsos. En estos pulsos se pueden catalogar los 0 como 0V y los 1 como 5V en señales TTL. También con este generador de pulsos se es capaz de variar la frecuencia de inyección.

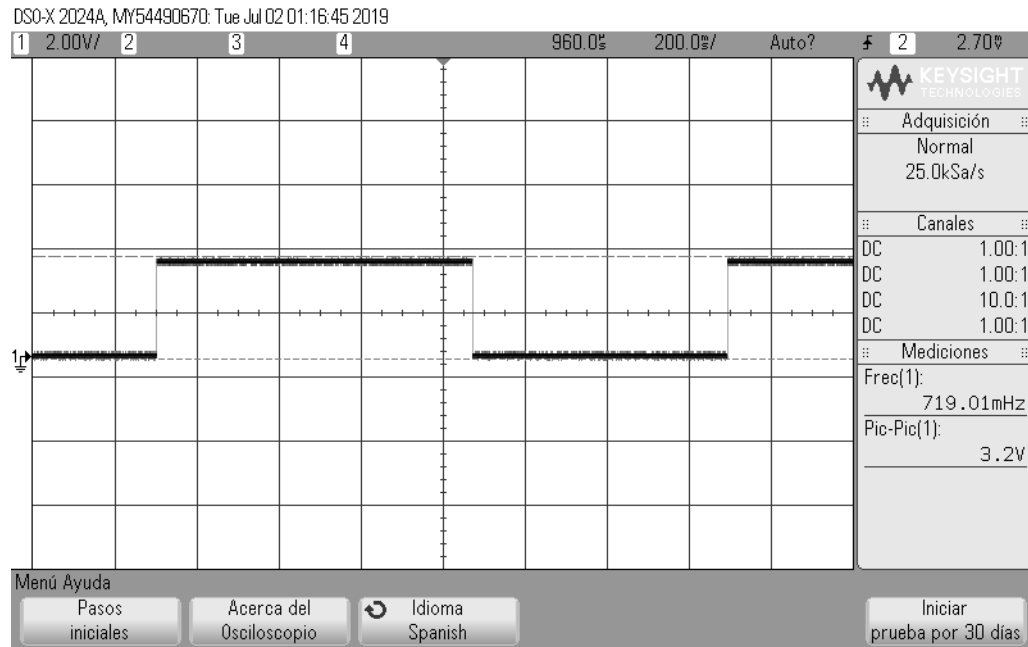


Figura A.7: Pulsos TTL para el puerto de Trigger/Gate.

- **Injector:** Mediante este puerto de salida, se envía la corriente eléctrica para energizar el inyector. Es muy importante tener presente los valores mínimos y máximos de la corriente eléctrica en la que puede operar el inyector. Se debe revisar la ficha técnica del inyector objeto de estudio, para ver estos valores, en caso de no contar con ésta información, se puede determinar estos valores mediante la medición de la inductancia utilizando la siguiente ecuación:

$$I = \frac{\phi * N}{L} \quad (\text{A.1})$$

Donde:

ϕ = Es el flujo magnético.

N = Es el número de vueltas de la bobina.

L = Es la inductancia.

I = Es la corriente máxima.

Si no se le dan correctamente los valores de corriente permisibles por el inyector, la bobina de éste se quemará.

- Enable: Este puerto es para controlar mediante el software, si el equipo está habilitado o deshabilitado.
- I_{mon} : Este puerto es usado para el monitoreo de la corriente.
- V_{mon} : Este puerto es usado para el monitoreo del voltaje.

A.4 CONFIGURACIÓN Y OPERACIÓN DEL PROGRAMA

Los elementos presentes en el menú principal al abrir el software del GENO-TEC, son:

- Barra del menú
- Barra de símbolos
- Área de estatus
- Área de entrada
- Ventana de mensajes
- Barra de estatus de comunicación

A.4.1 BARRA DEL MENÚ

En la Figura A.8, se observa la barra del menú. En esta barra se podrán visualizar diferentes apartados desde donde se podrá tener el acceso a diferentes configuraciones.

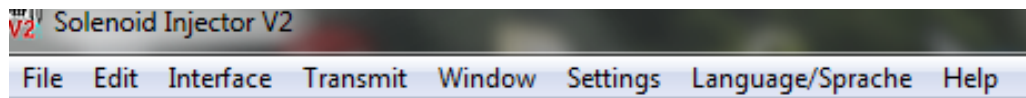


Figura A.8: Barra del menú.

- File: Lee y escribe archivos con una configuración de valores. En la Figura A.9, se pueden observar las diferentes opciones que nos presenta esta ventana.

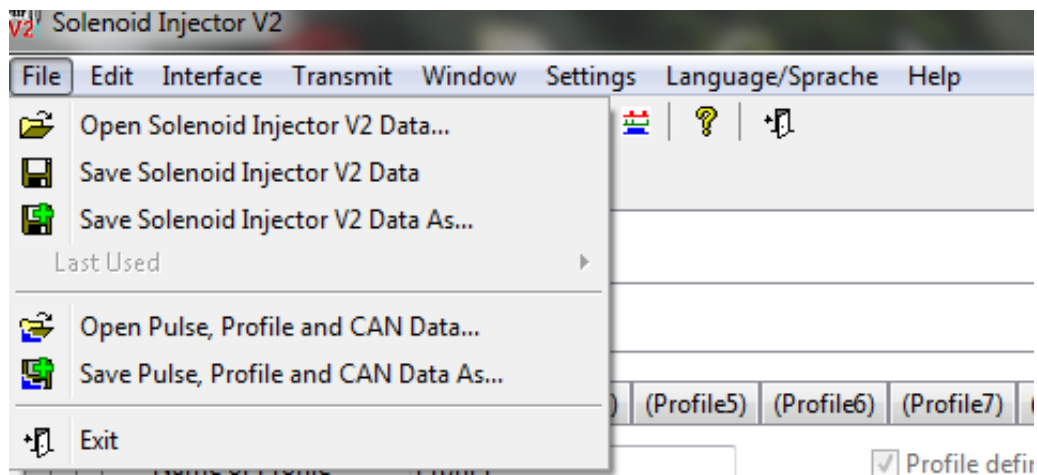


Figura A.9: File menú.

- Edit: Copia pulso, perfil y CAN-data. En la Figura A.10, se pueden observar las tres operaciones que se pueden realizar al ingresar a esta ventana.

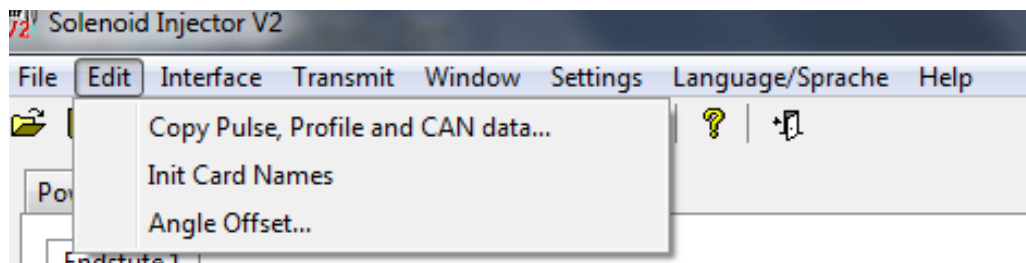


Figura A.10: Edit menú.

- Interface: Configuración de la comunicación hacia el inyector.
- Transmit: Este apartado contiene funciones muy importantes para la correcta realización de la conexión entre la PC y el equipo GENOTEC. En la Figura A.11, se pueden observar las siguientes funciones contenidas en el apartado transmit:
 1. Connect: Realiza la comunicación entre el equipo GENOTEC y el software.
 2. Disconnect: Corta la comunicación entre el equipo GENOTEC y el software.
 3. Get all data from solenoid injector V2: Esta función obtiene todos los datos obtenidos del solenoide.
 4. Send Data Changed to Solenoid Injector V2: Si algún parámetro o alguna configuración se ve sometida a un cambio, esta opción manda solamente los cambios efectuados.
 5. Send all Data to Solenoid Injector V2: Todos los parámetros y las configuraciones son transmitidas al equipo GENOTEC.

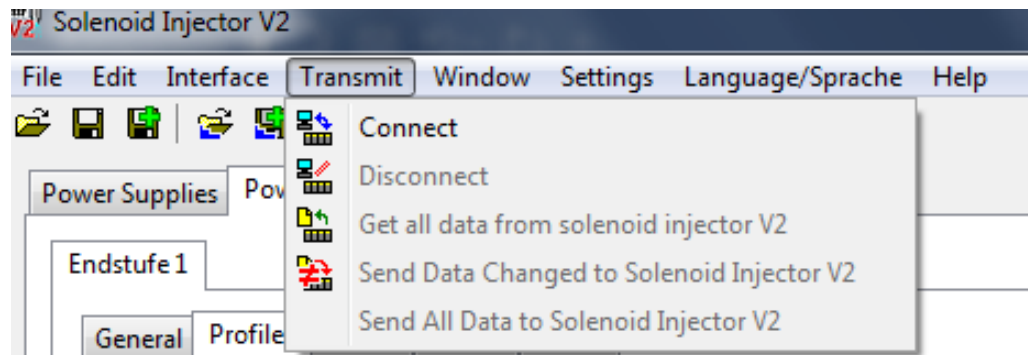


Figura A.11: Transmit menú.

- Window: Visualización del pulso.
- Settings: Configuración de histéresis para el control actual, para la interpretación del error y la visualización.
- Language: Cambia el lenguaje de la interface. En la Figura A.12, se pueden observar que los lenguajes disponibles son el inglés y el alemán.



Figura A.12: Language menú.

- Help: Despliega la versión del software y el dato de contacto de la compañía GENOTEC.

A.4.2 BARRA DE SÍMBOLOS

Los íconos del menú de funciones se muestran en la Figura A.13. Esta barra sirve como un menú de acceso rápido, esto se debe a que las acciones se ejecutan inmediatamente después de hacer click en el símbolo. Es importante mencionar que, si la comunicación entre la PC y el inyector es establecida, se habilita el ícono de “Send Data with Enter Key”. Esta función transmite parámetros de entrada directamente hasta el inyector.



Figura A.13: Barra de símbolos.

A.4.3 VENTANA DE MENSAJES

En esta ventana se muestra las acciones que el programa ejecuta, así como el estatus y la información de error.

A.4.4 BARRA DE ESTATUS DE COMUNICACIÓN

Esta barra muestra un pequeño informe de la comunicación entre la PC y el inyector con los siguientes puntos:

- Interfase: COMx, USB y resp. TCP:192.168.0.1:Com A.
- Comunicación: Offline/Online.
- Status: OK resp. Error Message

A.5 EJEMPLO DE CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE

En este apartado se encuentra un ejemplo real de la configuración realizada para un evento de inyección múltiple. En la Figura A.14, se muestran los parámetros establecidos para el perfil 1.

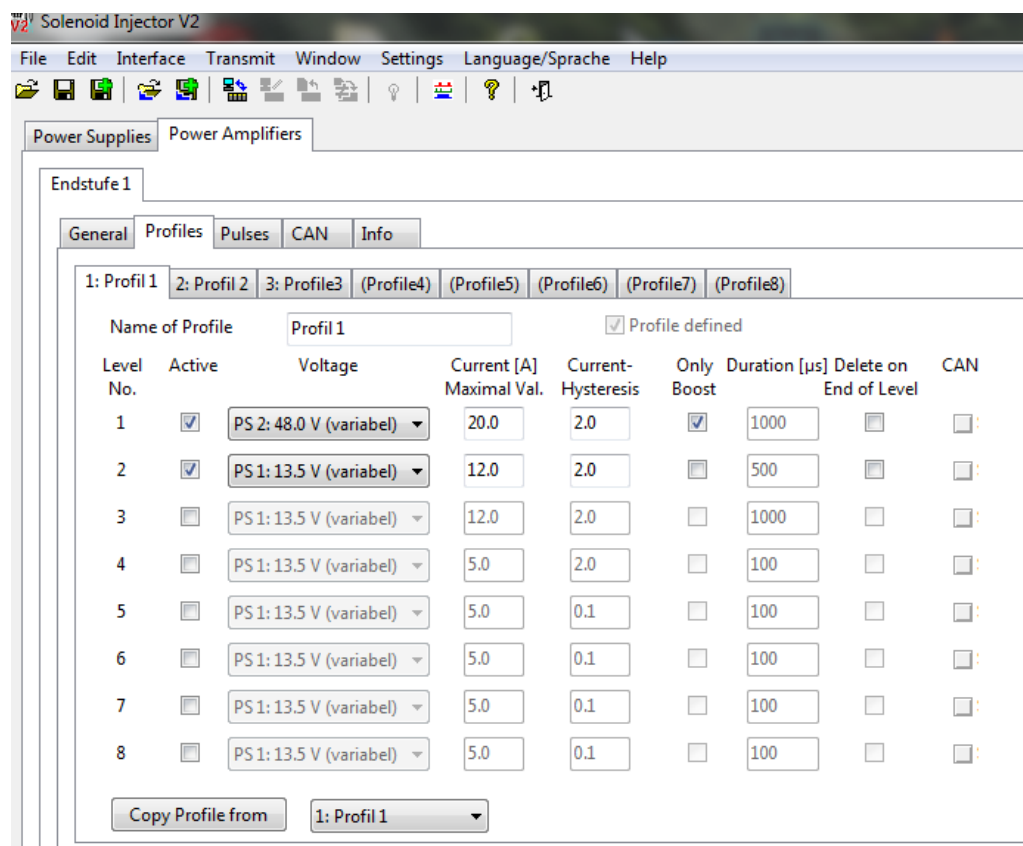


Figura A.14: Parámetros para el perfil 1.

Ahora se muestra en la Figura A.15, la siguiente configuración del segundo perfil. Al tener este segundo perfil se podrá ajustar la configuración de los pulsos asignados para cada perfil.

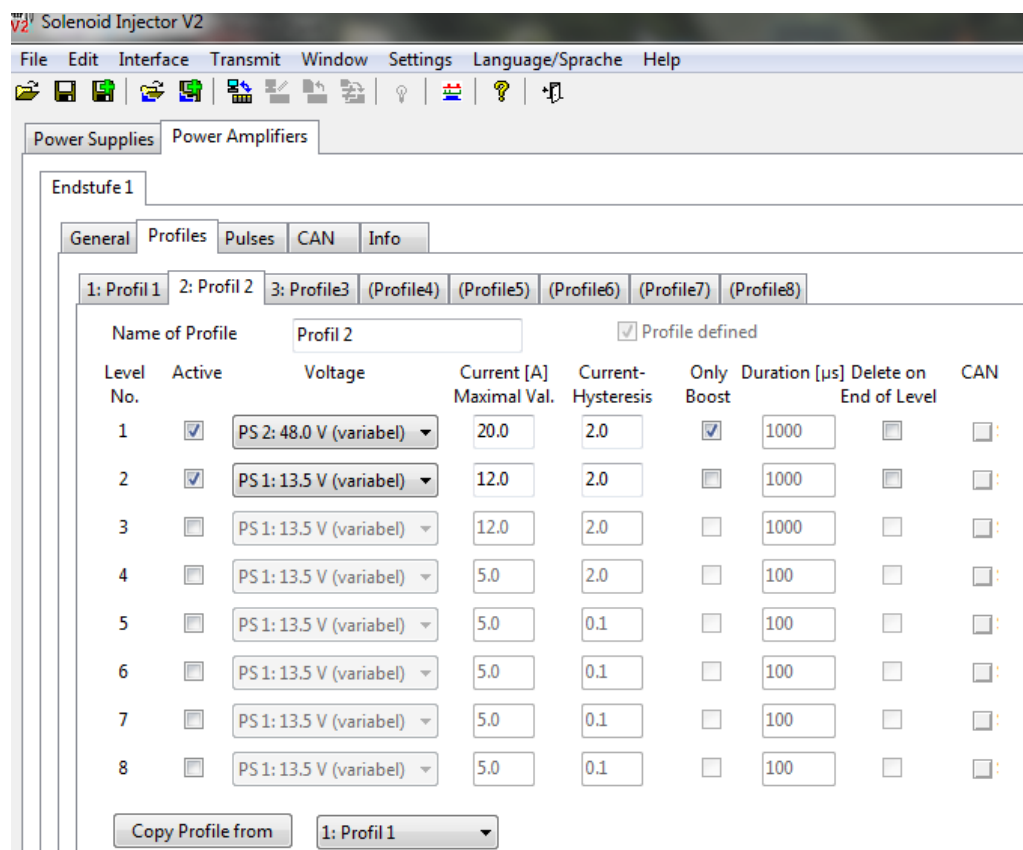


Figura A.15: Parámetros para el perfil 2.

En la Figura A.16, se muestra la configuración realizada para los pulsos a mandar, estos pulsos se pueden visualizar como se muestra en la Figura A.17, estas configuraciones se pueden habilitar o deshabilitar mediante la opción “Active”.

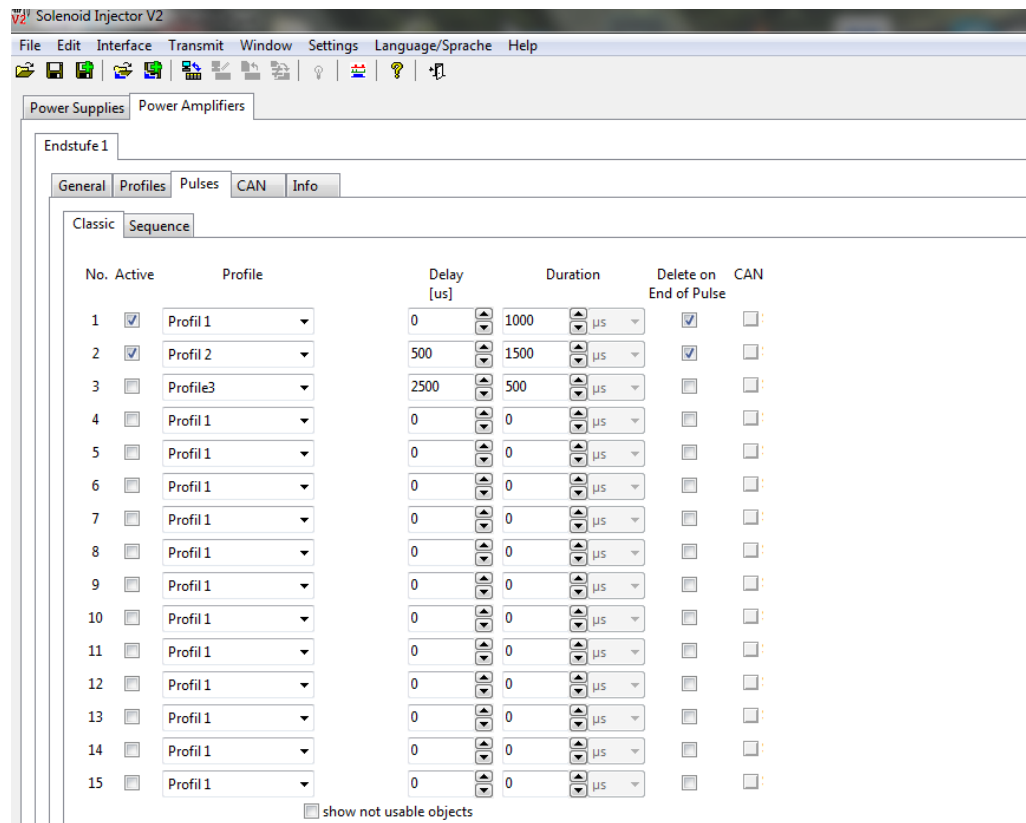


Figura A.16: Duración de pulsos.

Para el perfil 1 se tiene un retardo de 0 μ s y una duración de 500 μ s. Para el pulso del perfil 2 se tiene un retardo de 1500 μ s y una duración de 1500 μ s. Mediante esta configuración de pulsos se obtendrá la secuencia mostrada en la Figura A.17.

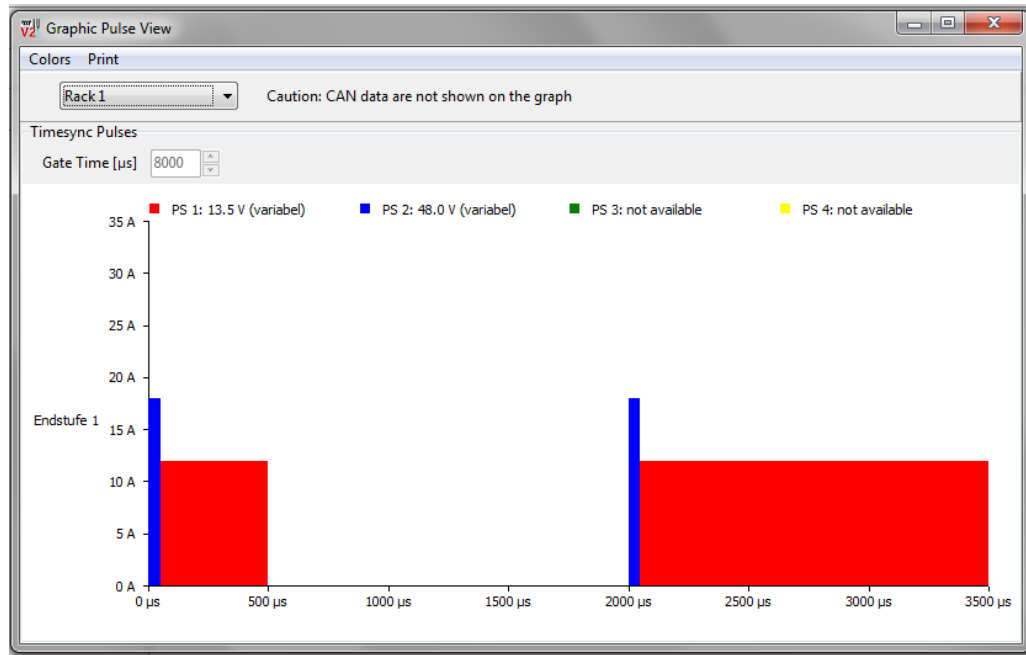


Figura A.17: Visualización de pulsos.

La Figura A.18, muestra el perfil del pulso eléctrico que recibe el inyector bajo la misma configuración que en la Figura A.16 obtenida en un osciloscopio, se puede apreciar mejor los detalles como el voltaje de apertura y el voltaje de mantenida.

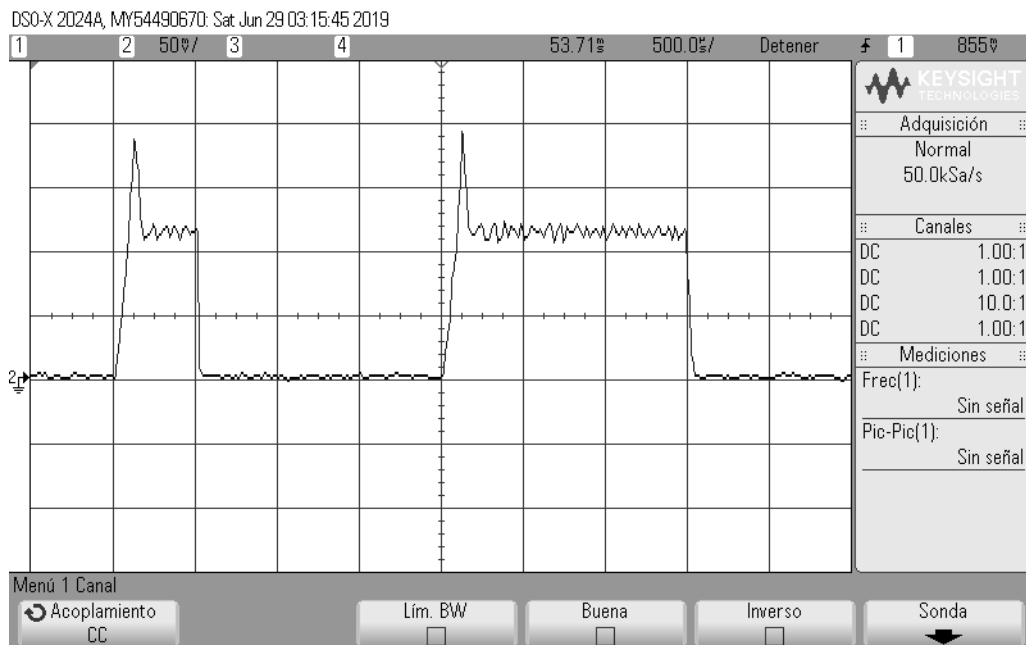


Figura A.18: Perfil de pulsos eléctricos obtenidos en un osciloscopio.

En la Figura A.18, se puede ver el pico de apertura de 48V, y el voltaje de mantenida de 13.5V. justo como se configuró en el perfil 1 y 2.

En la Figura A.19, se muestra como configuración extra, que parámetros se pueden ajustar en caso de implementar amplificadores extras. En este ejemplo no se necesitó hacer una configuración a esto, se dejaron los parámetros establecidos por default.

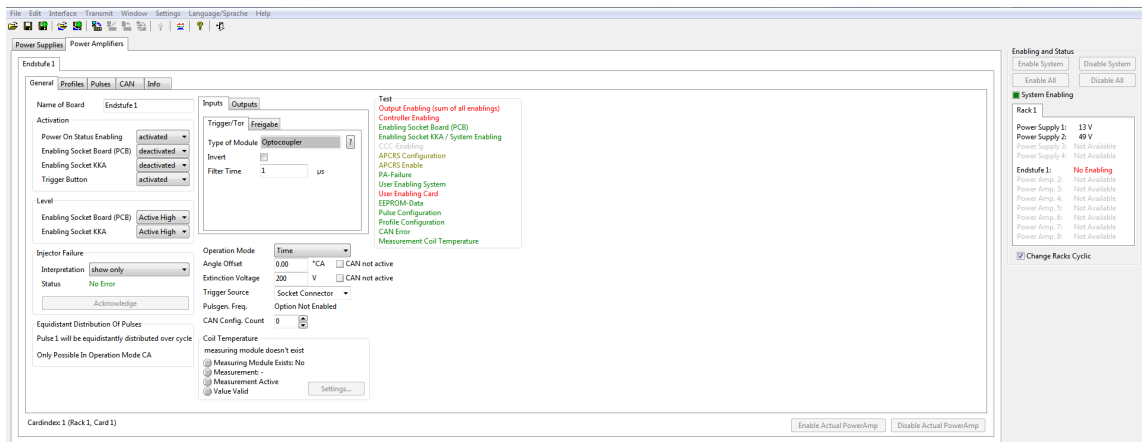


Figura A.19: Parámetros de amplificadores.

La configuración de activación será la siguiente:

- Power On Status Enabling: activated.
- Enabling Socket Board (PCB): deactivated.
- Enabling Socket KKA: deactivated
- Trigger Button: activated

La configuración de activación será:

- Enabling Socket Board (PCB): deactivated.
- Enabling Socket KKA: deactivated

La configuración de las entradas será:

- Type of module: Optocoupler
- Invert: deactivated
- Filter Time: 1 μ s

Como parámetros extra se obtiene lo siguiente:

- Operation Mode: Time
- Angle offset: 0.00
- Extinction voltage: 200
- Trigger Source: Socket Connector
- CAN Config. Count: 0

A.6 CONCLUSIONES

El presente anexo se centró en detallar la información necesaria para operar correctamente el equipo GENOTEC (Solenoid Injector Power Amplifier V2). También se mostró un ejemplo especificando los parámetros (i.e. configuración de los perfiles de voltaje y configuración del pulso eléctrico) para ayudar a una mejor comprensión de la operación de dicho equipo.

El equipo GENOTEC es muy versátil, se pueden estudiar diferentes estrategias de inyección múltiple, bajo diferentes configuraciones de corriente y voltaje, el equipo es de respuesta muy rápida por eso es necesario tener una guía detallada sobre este equipo.